

**ANALISIS DOSIS PENGOBATAN KANKER PANKREAS DENGAN
BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) MENGGUNAKAN
PROGRAM *PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE* (PHITS)**

TUGAS AKHIR SKRIPSI

**Diajukan Kepada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Guna Memperoleh Gelar Sarjana Sains**



Oleh

**AZZAM ZUKHROFANI IMAN
(14306141034)**

**PROGRAM STUDI FISIKA
JURUSAN PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS NEGERI YOGYAKARTA**

2018

ANALISIS DOSIS PENGOBATAN KANKER PANKREAS DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY* (BNCT) MENGGUNAKAN PROGRAM *PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE* (PHITS)

Oleh:

Azzam Zukhrofani Iman

14306141034

ABSTRAK

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) merupakan salah satu metode alternatif pengobatan kanker yang bersifat non-invasif. Pengobatan BNCT pada kanker pankreas masih membutuhkan informasi dan tahap uji pra klinis. Simulasi menggunakan PHITS yang bertujuan untuk menentukan: konsentrasi boron yang efektif, laju dosis total, dan lama waktu iradiasi pada konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas, telah dilakukan dalam penelitian ini.

PHITS digunakan untuk memodelkan dan mendefinisikan geometri (organ pankreas, kanker, dan organ kritis terdekat), material penyusun organ, dan juga sumber radiasi. Bentuk phantom yang digunakan adalah phantom ORNL pria dewasa. Sumber neutron yang digunakan disesuaikan dengan keluaran Reaktor Kartini, PSTA BATAN Yogyakarta. Penelitian ini menggunakan konsentrasi boron sebesar 100, 110, 120, 130, 140, dan 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan kanker untuk mengantisipasi jaringan kanker pankreas yang terletak cukup dalam dari permukaan kulit.

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini adalah: konsentrasi boron yang efektif dalam rentang 100 $\mu\text{g/g}$, 110 $\mu\text{g/g}$, 120 $\mu\text{g/g}$, 130 $\mu\text{g/g}$, 140 $\mu\text{g/g}$, dan 150 $\mu\text{g/g}$ adalah konsentrasi boron 150 $\mu\text{g/g}$, nilai laju dosis konsentrasi boron yang efektif 150 $\mu\text{g/g}$ jaringan adalah $5,72 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}$, dan waktu iradiasi terpendek adalah 8736,72 detik (2 jam 26 menit 37 detik) pada konsentrasi boron 150 $\mu\text{g/g}$. Dosis serap pada jaringan kulit berkisar 1,69 Gy dimana nilai ini masih dibawah dosis ambang yang direkomendasikan oleh BAPETEN.

Kata kunci: Simulasi komputer, BNCT, Kanker Pankreas, PHITS

DOSE ANALYSIS OF PANCREATIC CANCER TREATMENT WITH BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) USING PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE (PHITS) PROGRAM

By:

Azzam Zukhrofani Iman

14306141034

ABSTRACT

Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) is an emerging noninvasive radiation therapy alternative for cancer treatment today. Eventhough, BNCT treating on pancreatic cancer still needs pre-clinical information and test. Computer simulation using a PHITS program to determine: the effective boron concentration, the total dose rate, and the length of irradiation time at its effective boron concentrations for the treatment of pancreatic cancer, has been reported in this research.

PHITS has been used to model and define the geometry (pancreatic tissue, cancer, and organ at risk), tissue building material, and also the radiation sources. The form of phantom was used an adult male of ORNL phantom. The neutron source as a radiation source using the Kartini Reactor, PSTA BATAN Yogyakarta output spesification.

The simulation results showed that: the effective boron concentration for pancreatic cancer treatment was 150 $\mu\text{g/g}$ tissue, the value of an effective boron concentration of 150 $\mu\text{g} / \text{g}$ tissue dose rate was 5.72×10^{-3} Gy/second, and the shortest irradiation time was 8736,72 second (2 hour 26 minute 37 second) for the boron concentration of 150 $\mu\text{g/g}$ tissue. The determined absorption dose at the skin tissue was about 1,69 Gy which is still below the BAPETEN threshold dose recommendation.

Keyword: Computer simulation, BNCT, Pancreatic cancer, PHITS

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Azzam Zukhrofani Iman

NIM : 14306141034

Program Studi : Fisika

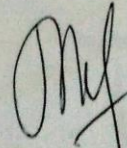
Judul Skripsi : Analisis Dosis Pengobatan Kanker Pankreas dengan
Boron

*Neutron Capture Therapy (BNCT) menggunakan Program
Particle And Heavy Ion Transport Code (PHITS).*

menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar karya saya sendiri. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali sebagai acuan kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang telah lazim.

Yogyakarta, 03 Oktober 2018

Yang menyatakan,



Azzam Zukhrofani Iman
NIM 14306141034

LEMBAR PERSETUJUAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul

**ANALISIS DOSIS PENGOBATAN KANKER PANKREAS DENGAN
BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) MENGGUNAKAN
PROGRAM PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE (PHITS)**



Disusun oleh:
Azzam Zukhrofani Iman
NIM 14306141034

telah memenuhi syarat dan disetujui oleh Dosen Pembimbing untuk
dilaksanakan Ujian Akhir Tugas Akhir Skripsi bagi yang
bersangkutan.

Yogyakarta, September 2018

Menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,

Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU
NIP 19590610 198103 1 002.

Dr. Restu Widiatmono, M.Si.
NIP 197205221998021001

Mengetahui,
Ketua Program Studi Fisika

Nur Kadarisman, M.Si.
NIP 19640205 199101 1 001

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir Skripsi dengan Judul



**ANALISIS DOSIS PENGOBATAN KANKER PANKREAS DENGAN
BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) MENGGUNAKAN
PROGRAM *PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE (PHITS)***

Disusun oleh:

Azzam Zuhrofani Iman
NIM 14306141034

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji Tugas Akhir Skripsi
Program Studi Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Pada tanggal 28 September 2018

TIM PENGUJI

Nama/ Jabatan	Tanda Tangan	Tanggal
<u>Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU</u> Ketua Penguji		5/10/2018
<u>Dr. Restu Widiatmono, M.Si.</u> Sekretaris Penguji		4/10/2018
<u>Nur Kadarisman, M.Si</u> Penguji Utama		4/10/2018

Yogyakarta, 9/10/18

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Negeri Yogyakarta
Dekan,



Dr. Hartono, M.Si
NIP 19620329 198702 1 002

TUGAS AKHIR SKRIPSI

ANALISIS DOSIS PENGOBATAN KANKER PANKREAS DENGAN *BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT)* MENGGUNAKAN PROGRAM *PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE (PHITS)*

Oleh :
Azzam Zukhrofani Iman
NIM 14306141034

Telah Disetujui dan Disahkan
Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA BATAN) Yogyakarta
pada tanggal :

Kepala Bidang Fisika Partikel

Pembimbing di PSTA BATAN

Ir. Puradwi Ismu Wahyono, DEA
NIP 19611025 198810 1 001

Prof. Ir. Yohannes Sardjono, APU
NIP 19590610 198103 1 002

Menyetujui,
PLT Kepala PSTA BATAN

Edy Giri Rachman Putra, Ph.D
NIP 19700327 199403 1 003

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

“Sesungguhnya bersama kesulitan itu ada kemudahan. Maka apabila kamu telah selesai (dari sesuatu urusan), tetaplah bekerja keras (untuk urusan yang lain).”
(QS. Al Insyirah: 6-7)

“.....kemudian, apabila engkau telah membulatkan tekad, maka bertawakallah kepada Allah. Sungguh, Allah mencitai orang yang bertawakal.”
(QS. Ali Imran: 159)

Skripsi ini saya persembahkan untuk

Kedua orang tua saya Bapak Wahidin dan Ibu Khaeriyatun Umamah, serta adik-adikku M. Muzakki Arrozaq dan Farradina Assyifa Naziya atas doa dan dorongannya selama ini.

Untuk para guru dan dosen yang selama ini telah berjasa dalam mengajarkan berbagai ilmu dan juga atas didikannya..

Serta untuk sahabat-sahabatku yang sedang berjuang bersama menyelesaikan skripsi khususnya tim KBK Nuklir UNY 2014 dan keluarga fisika UNY 2014.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir skripsi dengan judul **“Analisis Dosis Pengobatan Kanker Pankreas dengan *Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)* menggunakan Program *Particle And Heavy Ion Transport Code System (PHITS)*”**. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna memperoleh gelar sarjana pada program studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta.

Dalam penyusunan laporan ini, penulis banyak mendapatkan bantuan bimbingan baik dukungan moril, spiritual maupun material, dan dorongan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Hartono selaku Dekan FMIPA Universitas Negeri Yogyakarta, yang telah membantu pengesahan skripsi ini.
2. PLT Kepala PSTA BATAN Edy Giri Rachman Putra, Ph.D yang telah memberikan izin penelitian di PSTA BATAN.
3. Bapak Yusman Wiyatmo, M.Si selaku Ketua Jurusan Pendidikan Fisika dan Bapak Nur Kadarisman, M.Si selaku Ketua Prodi Fisika.
4. Bapak Prof. Ir. Yohannes Sardjono, A.P.U. dan Dr. Restu Widiatmono, M.Si. sebagai pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan, arahan, dan motivasi.
5. Orang tua yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan moril serta materiil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan lancar.
6. Teman-teman seperjuangan penelitian BNCT Dani, Faisal, Yatsrib, Dila, dan Bayu serta teman-teman Fisika UNY
7. Bapak Rasito, Bapak Widarto, Mbak Rosi, Mbak Afifah, Mas Made yang telah membantu dan mengarahkan dalam penelitian.

8. Serta semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terima kasih atas segala dukungan dan bantuannya. Semoga Allah SWT memberikan balasan pahala yang setimpal.

Penulis menyadari bahwasanya dalam penelitian maupun penulisan skripsi ini terdapat banyak kekurangan. Namun, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan penelitian selanjutnya.

Yogyakarta, 8 Oktober 2018

Penulis

Azzam Zukhrofani Iman

DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
ABSTRAK	ii
<i>ABSTRACT</i>	iii
SURAT PERNYATAAN	iv
LEMBAR PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang.....	1
B. Identifikasi Masalah	9
C. Pembatasan Masalah	9
D. Perumusan Masalah	10
E. Tujuan Penelitian.....	10
F. Manfaat Penelitian.....	11
BAB II KAJIAN PUSTAKA	12
A. Pankreas.....	12
B. Kanker Pankreas	13
1. Epidemiologi Kanker Pankreas	14
2. Penyebab Kanker Pankreas	15
3. Patologi Anatomi.....	15
4. Stadium Kanker Pankreas	16
C. Senyawa Boron.....	17
D. <i>Boron Neutron Capture Therapy</i>	17
1. Agen Pembawa Boron	19

2. Sumber Neutron	20
3. Dosis BNCT	23
E. Metode Monte Carlo: PHITS	26
F. Kerangka Berpikir	28
 BAB III METODE PENELITIAN	 30
A. Waktu dan Tempat Penelitian	30
B. Instrumen Penelitian	30
1. Perangkat Keras.....	30
2. Perangkat Lunak.....	30
C. Alur Penelitian	31
D. Data Geometri	31
E. Data Geometri	32
F. Variabel Penelitian.....	33
G. Penggunaan PHITS	33
1. Input PHITS	33
2. Running PHITS	37
3. Output PHITS	38
H. Teknik Analisis Data.....	39
1. Perhitungan Jumlah Atom	39
2. Perhitungan Laju Dosis BNCT	39
3. Perhitungan Waktu Iradiasi	42
4. Perhitungan <i>Dosis Organ at Risk</i>	43
 BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	 44
A. Pemodelan <i>Phantom</i>	44
B. Pemodelan Sumber Neutron	45
C. Fluks Neutron.....	47
D. Laju Dosis	49
E. Waktu Iradiasi	55
F. Dosis Serap	56

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	60
A. Kesimpulan	60
B. Saran	60
 DAFTAR PUSTAKA	 61
LAMPIRAN-LAMPIRAN	66

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Insidensi terjadinya kasus kanker di seluruh dunia pada tahun 2015	2
Tabel 2. Kasus Kematian akibat kanker di seluruh dunia pada tahun 2015	2
Tabel 3. Stadium Kanker Pankreas	17
Tabel 4. Parameter berkas neutron yang disarankan IAEA	22
Tabel 5. Nilai RBE dari berbagai jenis radiasi	24
Tabel 6. Nilai faktor bobot biologis pada perhitungan dosimetri BNCT.....	25
Tabel 7. Fraksi massa unsur-unsur material geometri	32
Tabel 8. Deskripsi format penulisan <i>surface</i>	35
Tabel 9. Daftar surface pada PHITS	35
Tabel 10. Deskripsi penulisan <i>cell section</i>	36
Tabel 11. Jenis-jenis tally PHITS	37
Tabel 12. Nilai fluks neutron termal pada jaringan kanker.....	49
Tabel 13. Laju dosis total tiap organ terhadap konsentrasi boron	50
Tabel 14. Nilai laju dosis total terhadap konsentrasi boron	51
Tabel 15. Nilai Laju dosis partikel terhadap konsentrasi boron	53
Tabel 16. Waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron	55
Tabel 17. Dosis serap yang diterima jaringan sehat	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Letak pankreas didalam tubuh	13
Gambar 2.2 Bagian-bagian Pankreas	14
Gambar 2.3 Kurva distribusi fluks neutron termal dan neutron epitermal	21
Gambar 2.4 Probabilitas interaksi neutron dengan materi	27
Gambar 3.1 Alur Penelitian	31
Gambar 3.2 Contoh <i>running</i> PHITS	38
Gambar 3.3 Contoh keluaran grafik PHITS	38
Gambar 4.1 Pemodelan <i>Phantom</i>	44
Gambar 4.2 Desain kolimator beam port tembus radial Reaktor Kartini	45
Gambar 4.3 Arah sumber neutron dalam simulasi	46
Gambar 4.4 Distribusi fluks neutron pada kedalaman <i>phantom</i>	48
Gambar 4.5 Distribusi laju dosis terhadap konsentrasi boron	51
Gambar 4.6 Hubungan konsentrasi boron terhadap laju dosis	52
Gambar 4.7 Waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron	56
Gambar 4.8 Dosis serap jaringan kulit per konsentrasi boron	58

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Kode Input PHITS konsentrasi boron 150 $\mu\text{g/g}$ kanker	67
Lampiran 2 Perhitungan Fraksi Massa Boron-10 pada Tiap Jaringan	78
Lampiran 3 Perhitungan Laju Dosis	83
Lampiran 4 Fluks Neutron tiap Konsentrasi Boron	85
Lampiran 5 Perhitungan waktu iradiasi dan dosis OAR	88
Lampiran 6 Data fraksi dosis serap gama	90

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kanker merupakan penyakit di mana sekelompok sel abnormal tumbuh tidak terkendali dengan mengabaikan aturan normal pembelahan sel (Hejmadi, 2009). Pada sel normal, sel tumbuh dan membelah secara terkendali serta berfungsi dengan baik. Pertumbuhan sel tak terkendali menyebabkan benjolan yang dikenal sebagai tumor. Tumor primer selain dapat tumbuh besar dan menyerang jaringan di dekatnya, juga dapat mengirim sel kanker ke daerah lain di dalam tubuh dan membentuk metastasis (Güngör et al., 2014). Metastasis adalah penyebaran sel kanker dari satu jaringan atau ke jaringan lain melalui darah atau kelenjar getah bening. Tumor dibagi menjadi dua, yaitu tumor jinak dan tumor ganas. Tumor jinak biasanya merupakan gumpalan lemak yang terbentuk dalam satu wadah yang menyerupai kantong, sel tumor jinak tak menyebar ke bagian lain tubuh penderita (Yulianti, 2010). Tumor ganas yang menyerang pada suatu jaringan dan menyebar dikenal secara umum sebagai kanker (Brunicardi et al., 2010).

Kanker sampai saat ini merupakan salah satu penyakit yang menakutkan serta mematikan, hal ini disebabkan oleh tingginya angka kematian yang disebabkan oleh penyakit tersebut. Pada tahun 2015, ada 17,5 juta kasus kanker di seluruh dunia dengan 8,7 juta kematian (Fitzmaurice et al., 2017). Secara nasional jumlah penderita kanker di Indonesia tahun 2013 sebesar 1,4% atau diperkirakan sekitar 347.792 orang. Provinsi Jawa Tengah dan Provinsi Jawa Timur merupakan provinsi dengan estimasi penderita kanker terbanyak, yaitu sekitar 68.638 dan 61.230 orang (Kementrian Kesehatan RI, 2015). Tabel 1 dibawah menunjukkan lima belas besar insidensi kasus kanker yang terjadi di seluruh dunia pada tahun 2015 dengan jumlah insidensi kasus penderita kanker terbanyak adalah kanker payudara yaitu sekitar 2,42 juta sedangkan kanker pankreas menduduki posisi ketiga belas yaitu sekitar 426.000 kasus. Tabel 2 menunjukkan kasus kematian akibat kanker

yang terjadi di seluruh dunia pada tahun 2015, terlihat bahwa trakea, bronkus, dan kanker paru-paru sebagai pembunuh nomor satu dengan 1,72 juta kasus dan kematian akibat kanker pankreas mencapai 412.000 kasus (Fitzmaurice et al., 2017).

Tabel 1. Insidensi terjadinya kasus kanker di seluruh dunia pada tahun 2015
(Fitzmaurice et al., 2017)

No.	Nama Kanker	Jumlah kasus pada kedua jenis kelamin (ribuan)
1.	Kanker payudara	2422
2.	Trakea, bronkus, dan kanker paru-paru	2019
3.	Kanker kolon dan rektum	1653
4.	Kanker prostat	1618
5.	Kanker perut	1313
6.	Kanker hati	854
7.	Limfoma non-Hodgkin	666
8.	Leukemia	606
9.	Kanker kandung kemih	541
10.	Kanker serviks	526
11.	Kanker esophagus	483
12.	Kanker rahim	455
13.	Kanker pankreas	426
14.	Kanker ginjal	425
15.	Bibir dan kanker rongga mulut	410

Tabel 2. Kasus Kematian akibat kanker di seluruh dunia pada tahun 2015
(Fitzmaurice et al., 2017)

No.	Nama Kanker	Jumlah kasus pada kedua jenis kelamin (ribuan)
1.	Trakea, bronkus, dan kanker paru-paru	1722
2.	Kanker kolon dan rektum	832
3.	Kanker perut	819
4.	Kanker hati	810
5.	kanker payudara	534
6.	Kanker esophagus	439
7.	Kanker pankreas	412
8.	Kanker prostat	366
9.	Leukemia	353
10.	Kanker serviks	239
11.	Limfoma non-Hodgkin	231

No.	Nama Kanker	Jumlah kasus pada kedua jenis kelamin (ribuan)
12.	Kanker otak dan sistem syaraf	229
13.	Kanker kandung kemih	188
14.	Kanker ovarium	161
15.	Leukemia myeloid akut	147

Kanker pankreas adalah salah satu kanker yang paling agresif dan mematikan (Husain, 2014). Di Amerika Serikat kanker pankreas menduduki peringkat ke-12 kanker yang sering terjadi dan peringkat ke empat kanker yang menyebabkan kematian. Diperkirakan terdapat 53.670 kasus kanker pankreas baru didiagnosis di Amerika Serikat pada 2017 (Siegel et al., 2017). Data yang diperoleh dari *Surveillance Epidemiology and End Results* (SEER), menyatakan insidensi dan tingkat kematian kanker pankreas adalah masing-masing 12,4 pria dan 10,9 wanita per 100.000 per tahun (Saab & Rayes, 2018). Di Asia, insidensi dan tingkat kematian kanker pankreas tahun 2012 masing-masing untuk pria dan wanita berturut-turut sebesar 143.363 dan 137.251 (Hadizadeh et al., 2014). Di Indonesia data penderita kanker pankreas masih cukup minim, total penderita kanker pankreas di Instalasi Rawat Inap RSUP Dr. Mohammad Hoesin Palembang tahun 2009-2013 adalah sebanyak 78 orang (Oktarina et al., 2015).

Sekitar 95% kanker pankreas muncul dari bagian eksokrin pankreas, yang terdiri dari sel-sel asinar yang menghasilkan dan melepaskan sekresi enzimatik ke dalam sistem duktus pankreas (Hartge et al., 2006), dengan 95% neoplasma pankreas adalah adenokarsinoma (Husain, 2014). Sekitar 70% kanker pankreas terletak di dalam kepala pankreas, 25% terletak di tubuh atau ekor, dan kurang dari 5% yang melibatkan seluruh pankreas (Walling & Freelove, 2017). Usia rata-rata

yang terdiagnosa kanker pankreas adalah 71 tahun, dengan 75% kasus yang terdiagnosa antara usia 55 dan 84 tahun dan usia rata-rata yang mengalami kematian akibat kanker pankreas adalah 73 tahun (Stark & Eibl, 2015). Sebagian besar kanker pankreas terjadi di negara-negara dengan indeks pembangunan manusia yang tinggi (Stewart dan Wild, 2014). Hanya kurang dari 5% kanker pankreas yang dapat bertahan hidup lebih dari lima tahun setelah terdiagnosa (Vinay, 2013).

Saat ini pengobatan medis yang dilakukan untuk pengobatan kanker pankreas meliputi operasi, kemoterapi, terapi radiasi, dan perawatan paliatif. Pilihan pengobatan dipilih tergantung pada stadium kanker pankreas. Tindakan bedah atau operasi dianggap sebagai satu-satunya pengobatan untuk penyembuhan dan dapat menghasilkan kelangsungan hidup yang jauh lebih lama dibandingkan dengan pilihan pengobatan lain (Kamisawa et al., 2016). Tetapi operasi hanya dapat dilakukan pada stadium awal. Pada kanker pankreas hanya 15% sampai 20% pasien yang dapat dilakukan tindakan operasi. Tingkat kelangsungan hidup lima tahun setelah operasi berkisar antara 10% sampai 30%, bergantung pada ukuran tumor dan histologi kanker (Walling dan Frelove, 2017). Kemoterapi dengan atau terapi radiasi dapat dilakukan sebelum atau sesudah operasi untuk memastikan tidak ada lagi sel-sel kanker yang terbentuk. Pada pasien stadium lanjut yang sudah tidak memungkinkan untuk dioperasi, maka kemoterapi dengan atau terapi radiasi dapat menjadi pilihan pengobatan.

Kemoterapi merupakan terapi yang melibatkan penggunaan zat kimia ataupun obat-obatan dalam pengobatan kanker (Ariani 2015). Kemoterapi merupakan salah satu bentuk terapi sistemik, yang berarti obat-obat yang digunakan

akan menyebar ke seluruh tubuh. Kemoterapi juga memiliki efek toksik terhadap jaringan normal sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada tubuh secara sistemik (Hakim & Ramli, 2012). Percobaan yang dilakukan *Eastern Cooperative Oncology Group* [ECOG] 4201 membandingkan pengobatan kemoradioterapi dengan kemoterapi pada pasien kanker pankreas stadium lanjut dan mendapatkan hasil rata-rata kelangsungan hidupnya adalah 9,2 bulan untuk kemoterapi dengan gemcitabine dan 11,1 bulan untuk kemoradioterapi (Kamisawa et al., 2016). Pada kanker pankreas yang sudah bermetastasis (menyebar ke berbagai organ lain) maka perawatan paliatif dapat dilakukan, yaitu perawatan untuk mengurangi gejala, seperti nyeri, ikterus obstruktif (kulit dan bagian putih mata menjadi berwarna kekuningan), atau adanya obstruksi (penyempitan) saluran pencernaan (Husain, 2014).

Terapi radiasi atau radioterapi dilakukan dengan menggunakan sinar-sinar berkekuatan tinggi untuk merusak atau menghancurkan sel-sel kanker dan menghentikan pertumbuhan kanker (Ariani 2015). Radiasi pengion digunakan dalam radioterapi karena dapat membentuk ion (partikel bermuatan listrik) dan menyimpan energi ke sel-sel jaringan yang melewatinya. Energi yang tersimpan ini bisa membunuh sel kanker atau menyebabkan perubahan genetik yang mengakibatkan kematian sel kanker (Fitriatuzzakiyyah et al., 2017). Radiasi pengion yang digunakan diantaranya sinar X, photon, proton, elektron, dan neutron. Tetapi pada teknik radioterapi konvensional masih memiliki kekurangan, yaitu ruang lingkup penyinaran terlalu luas sehingga bukan hanya tertuju pada sel kanker namun juga pada sel jaringan sehat (Saadeddin, 2012). Radioterapi yang ideal

adalah radioterapi yang dapat membunuh kanker tanpa merusak jaringan sehat disekitarnya.

Pendekatan pengobatan konvensional, seperti pembedahan, kemoterapi, radioterapi, dan perawatan paliatif hanya sedikit meningkatkan hasil penyembuhan pasien (Husain, 2014). Pengobatan kanker yang efektif diperlukan untuk meningkatkan persentase kesembuhan pasien. *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) adalah bentuk baru radioterapi yang dapat menjadi pilihan dalam pengobatan kanker. Metode BNCT juga merupakan penggabungan antara prinsip kemoterapi dan skema lokalisasi sinar yang digunakan dalam radioterapi konvensional (Kortesniemi, 2002). Metode BNCT menggunakan Boron-10 yang merupakan unsur nonradioaktif untuk menangkap neutron termal sehingga menghasilkan partikel alfa dan lithium (^7Li). Panjang jalur partikel alfa ini berada pada kisaran 4-10 μm . Oleh karena itu deposisi energi mereka terbatas pada diameter sel tunggal (Moss, 2014), (Sauerwein, 2012).

Boron Neutron Capture Therapy telah menunjukkan potensi besar untuk pengobatan beberapa jenis tumor agresif yang sulit untuk diobati, terutama yang menyusup ke jaringan sehat di sekitarnya (Edgecock et al., 2014). BNCT juga telah digunakan untuk mengobati berbagai kanker di berbagai negara, seperti: Amerika Serikat, Argentina, Finlandia, Italia, Jepang, Republik Ceko, Swedia, dan Taiwan (Nedunchezian, 2016).

Penelitian BNCT di Indonesia berada di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) BATAN Yogyakarta. Reaktor Kartini yang berada di kompleks PSTA BATAN Yogyakarta akan digunakan sebagai sumber neutron

BNCT. Reaktor kartini merupakan reaktor jenis TRIGA MARK-II yang mempunyai daya termal mencapai 100 kW (Warfi et al., 2016).

Terapi BNCT merupakan terapi yang melibatkan interaksi neutron dengan nuklida. Interaksi neutron dengan nuklida terdiri dari interaksi hamburan dan interaksi serapan. Pilihan dari suatu partikel untuk mengalami interaksi jenis tertentu bersifat random, akan tetapi probabilitas pilihan jenis interaksi tersebut ditentukan dari tampang lintang dari jenis-jenis interaksi (Sardjono 2015). Tampang lintang didefinisikan sebagai kebolehjadian dari suatu radiasi berinteraksi dengan suatu materi. Boron-10 memiliki tampang lintang mikroskopik interaksi tangkapan dengan neutron termal yang tinggi yaitu 3863,7 barn (Irhas, 2014). Sifat random pada interaksi partikel terdiri dari: arah gerak partikel, jarak bebas lintasan partikel, pilihan jenis partikel, arah hamburan partikel. Proses pergerakan sejumlah partikel dalam medium disebut sebagai proses transport partikel. Penyelesaian dari proses transport partikel bertujuan untuk memperoleh kuantitas dari partikel pada suatu posisi tertentu pada medium suatu benda atau sistem setelah terjadi proses transport partikel dalam waktu yang signifikan. Jumlah partikel ini dinyatakan sebagai densitas partikel atau fluks partikel. Besaran densitas partikel atau fluks partikel dikenal sebagai dosis radiasi (Sardjono 2015). Untuk menyelesaikan proses transport partikel digunakanlah proses simulasi menggunakan suatu program perangkat lunak.

Penggunaan simulasi pada pengobatan BNCT merupakan salah satu tahap uji pra klinis sebelum dilakukan uji secara langsung kepada pasien. Tujuan dari simulasi adalah untuk mendapatkan dosis yang tepat dan efektif selama pengobatan

kanker dengan terapi BNCT. Program simulasi yang digunakan dalam BNCT adalah program dengan metode monte carlo. Penggunaan simulasi metode monte carlo adalah salah satu metode yang paling akurat untuk memprediksi distribusi dosis yang diserap dalam terapi radiasi (Nedaie 2013). *Monte Carlo N-Partikel* (MCNP) merupakan program yang banyak digunakan untuk simulasi BNCT. MCNP dikembangkan pertama kali oleh *Los Alamos National Laboratory* (LANL) dan sekarang dikembangkan oleh *Radiation Safety Information Computational Center* (RRSIC) (Sardjono 2015). Penggunaan MCNP masih memiliki kekurangan dikarenakan keluaran yang dihasilkan masih belum berbentuk dosis. Sehingga perlu dikembangkan perangkat lunak yang lebih canggih seiring dengan kemajuan BNCT (Seki et al., 2017).

Program *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS) yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) merupakan pengembangan program berbasis monte carlo untuk simulasi nuklir. PHITS dapat digunakan untuk hampir semua jenis partikel, seperti neutron, proton, ion berat, foton, dan elektron, dengan berbagai macam energi dalam geometri tiga dimensi (Furuta et al., 2017). PHITS juga telah digunakan untuk berbagai bidang penelitian seperti ilmu radiasi, akselerator dan desain perisai, penelitian ruang angkasa, aplikasi medis, penelitian material, dan sebagainya (Niita et al., 2011). Penelitian ini menggunakan metode simulasi dengan program PHITS untuk mendapatkan dosis boron dan waktu iradiasi yang efektif selama pengobatan kanker pankreas dengan terapi BNCT.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat diidentifikasi permasalahan sebagai berikut:

1. Metode pengobatan konvensional pada pengobatan kanker pankreas, seperti: pembedahan, radioterapi, dan kemoterapi masih belum maksimal.
2. Pengobatan BNCT dapat menjadi alternatif pengobatan kanker tetapi masih memerlukan tahap uji pra klinis berupa simulasi untuk mendapatkan nilai dosis yang tepat.
3. Penggunaan program PHITS masih belum digunakan untuk menganalisis dosis pengobatan BNCT pada kanker pankreas.
4. Belum diketahui konsentrasi boron yang optimal untuk mengobati kanker pankreas dengan terapi BNCT.
5. Waktu pengobatan yang efektif masih belum diketahui untuk mengobati kanker pankreas dengan terapi BNCT.

C. Pembatasan Masalah

Penelitian ini membatasi permasalahan sebagai berikut:

1. Jenis tumor ini adalah kanker pankreas adenokarsinoma dan letak tumor kanker pankreas berada di badan kankreas.
2. Jenis stadium kanker pankreas IB dengan ukuran kanker berdiameter 2,5 cm yang masih terlokalisasi di pankreas dan belum bermetastasis.
3. Sumber neutron yang akan digunakan dengan menggunakan keluaran dari Reaktor Kartini berdaya 100 kW.

D. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, dan perumusan masalah diatas maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Berapa konsentrasi boron yang efektif untuk untuk pengobatan kanker pankreas?
2. Berapa laju dosis total pada konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas?
3. Berapa lama waktu iradiasi pada konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan Penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan konsentrasi boron yang efektif untuk membunuh sel kanker pada pankreas.
2. Menentukan laju dosis total pada konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas.
3. Menentukan lama waktu iradiasi pada konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah sebagai berikut:

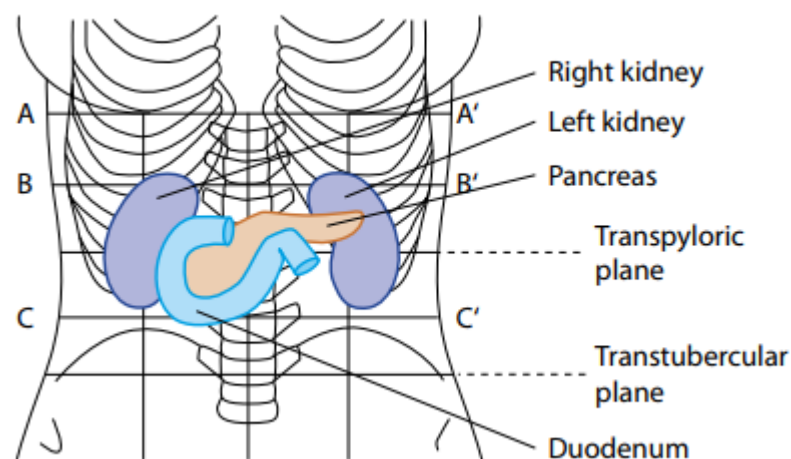
1. Sebagai referensi untuk melakukan uji *in vivo* dan *in vitro* pada *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) dengan menggunakan sumber neutron Reaktor Kartini.
2. Sebagai referensi pada bidang terapi *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT).

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

A. Pankreas

Pankreas merupakan suatu organ dalam sistem pencernaan manusia, memproduksi hormon insulin dan enzim untuk membantu proses pencernaan makanan di dalam perut. Gangguan pada pankreas dapat menyebabkan beberapa penyakit berbahaya seperti: diabetes melitus tipe 1 dan 2, pankreatitis, dan kanker pankreas (Sudoyo, et al. 2009).

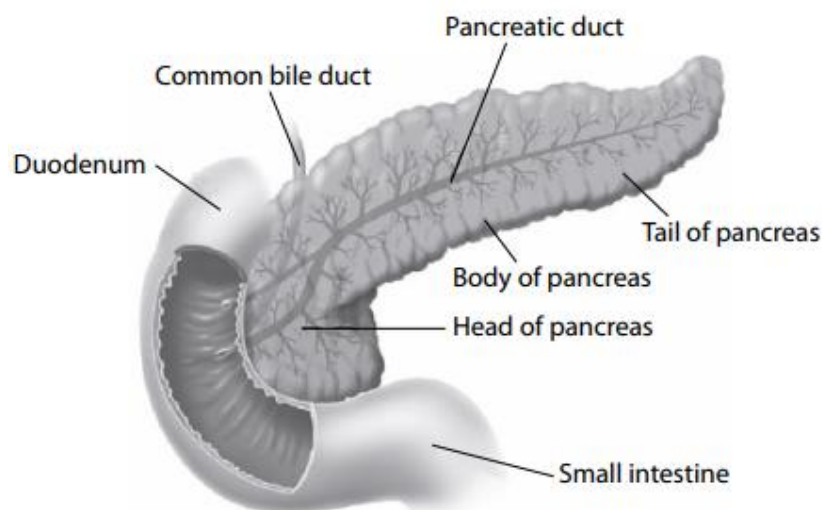


Gambar 2.1 Letak pankreas didalam tubuh manusia (Lu & Brady, 2011)

Pankreas terletak di bagian perut, dan di dekat organ duodenum (usus dua belas jari), ginjal, dan pembuluh darah utama termasuk sumbu celiac dan arteri mesenterika superior (Lu & Brady, 2011). Pada orang dewasa, pankreas memiliki berat 75-100 g dan panjangnya sekitar 15-20 cm. (Brunicardi et al., 2010).

Pankreas memiliki empat daerah yaitu kaput (kepala), kollum (leher), karpus (badan), dan kauda (ekor). Kaput pankreas merupakan bagian yang terletak

pada bagian cekung duodenum (usus dua belas jari). Permukaan depan kaput pankreas berbatasan dengan kolon transversum dan jejunum (usus kosong), sedangkan permukaan belakang berbatasan dengan vena kava inferior, duktus koledokus, dan usus renalis. Kollum pankreas merupakan bagian yang menghubungkan kaput pankreas dengan korpus pankreas. Korpus pankreas adalah bagian yang menuju ligamentum lienorenalis dan mengadakan hubungan dengan hilus limpa (Syaifuddin 2011). Sedangkan kauda merupakan bagian ujung dari pankreas yang meruncing.



Gambar 2.2 Bagian-bagian Pankreas (Lu & Brady, 2011)

B. Kanker Pankreas

Kanker pankreas merupakan kanker ganas yang ditemukan pada sel-sel jaringan pankreas. Secara umum sel-sel kanker pankreas berasal dari jaringan eksokrin.

1. Epidemiologi Kanker Pankreas

Epidemiologi merupakan gambaran dan persebaran dari suatu penyakit. Kanker pankreas merupakan salah satu kanker yang paling mematikan di dunia. Jumlah kejadian dan kematian kanker pankreas hampir sama. Pada tahun 2015 jumlah kejadian kasus kanker pankreas mencapai 426.000 kasus dengan jumlah kematian mencapai 412.000 kasus (Fitzmaurice et al., 2017). Di Amerika Serikat kanker pankreas menduduki posisi keempat sebagai kanker yang menyebabkan kematian baik pada pria maupun wanita (Siegel et al., 2017), (Walling dan Freelove, 2017). Pada tahun 2017, di Amerika Serikat diperkirakan ada 53.670 diagnosis baru dan lebih dari 43.030 kematian akibat kanker pankreas (Siegel et al., 2017). Jumlah kasus baru kanker pankreas mencapai 12,4 per 100.000 pria dan wanita per tahun dengan jumlah kematian 10,9 per 100.000 pria dan wanita per tahun (Saab & Rayes, 2018).

Kematian akibat kanker pankreas tahun 1980-2013 pada pria secara keseluruhan meningkat di wilayah Uni Eropa (UE), Eropa Selatan dan Timur, Brazil, Jepang, dan Republik Korea. Keseluruhan kematian kanker pankreas menurun di sebagian besar negara di wilayah Eropa Utara, Australia, Kanada, Meksiko, dan Amerika Serikat (AS). Pada wanita, angka kematian meningkat di wilayah Uni Eropa, Brasil, Amerika Serikat, Jepang, dan Republik Korea namun menurun di negara Kanada dan Meksiko. Pada tahun 2012, Eropa Timur dan Jepang memiliki tingkat kematian pankreas tertinggi untuk kedua jenis kelamin (Lucas et al., 2016). Di Indonesia tingkat kematian tahunan per 100.000 orang dari kanker pankreas meningkat 62,3% sejak tahun 1990 sebesar rata-rata 2,7% per tahun.

Kematian kanker pankreas di Indonesia memuncak pada usia 80 tahun baik pada pria maupun wanita. Pada tahun 2013 tingkat kematian mencapai 37 kematian per 100.000 pria dengan tingkat kematian tertinggi untuk pria lebih tinggi daripada wanita, yaitu 29,1 per 100.000 wanita (health grove, 2016).

2. Penyebab Kanker Pankreas

Penyebab pasti dari kanker pankreas masih belum diketahui, akan tetapi asap rokok diduga menjadi faktor risiko pemicu utama penyebab kanker pankreas. Pada perokok, risiko kanker pankreas adalah 1,4 - 2,3 kali dibanding nonperokok (Sudoyo, et al. 2009).

Selain itu, minuman beralkohol juga dapat memicu kerusakan pankreas. Minuman alkohol dapat meningkatkan risiko kanker melalui beberapa mekanisme: memetabolisme etanol menjadi asetaldehida yang dapat merusak DNA, menghasilkan oksigen yang reaktif, merusak berbagai nutrisi (vitamin A, vitamin B kompleks, vitamin C, vitamin D, vitamin E, dan karotenoid) (Popescu valceanu et al., 2015).

3. Patologi Anatomi

Hampir 90% kanker pankreas berasal dari duktus, di mana 75% bentuk klasik adenokarsinoma sel duktal yang memproduksi enzim musin, yang digunakan untuk melicinkan makanan. Adenokarsinoma merupakan jenis tumor ganas yang melapisi saluran pankreas. Sekitar 70% kanker pankreas terletak di dalam kepala pankreas, 25% terletak di tubuh atau ekor, dan kurang dari 5% melibatkan seluruh pankreas (Walling & Frelove, 2017).

Tumor yang dapat dioperasi umumnya memiliki besar 2,5-3,5 cm. Pada sebagian besar kasus tumor sudah berukuran cukup besar (5-6 cm), dan atau telah terjadi infiltrasi dan melekat pada jaringan sekitar. Kondisi ini menyebabkan tumor tidak dapat dioperasi. Pada umumnya tumor meluas ke bagian retroperitonal ke belakang pankreas, melapisi dan melekat pada pembuluh darah, dan secara mikroskopik terdapat infiltrasi di jaringan lemak peripankreas, saluran limpa, dan perineural. Pada stadium lanjut, kanker kaput pankreas sering bermetastasis ke organ duodenum, lambung, peritonium, hati dan kandung empedu. Kanker pankreas pada badan dan ekor pankreas dapat bermetastasis ke hati, peritonium, limpa, lambung dan kelenjar adrenal kiri (Sudoyo, et al. 2009).

4. Stadium Kanker Pankreas

Pentahapan kanker pankreas pada umumnya berdasarkan klasifikasi TNM (Tumor, Nodul, Metastasis). Kategori T (Tumor) menggambarkan ukuran tumor, Nodul atau *node* menggambarkan jangkauan kanker terhadap kelenjar getah bening atau kelenjar limpa didekatnya, metastasis sebagai persebaran kanker dalam jaringan. Tumor T₁ terbatas pada pankreas dan berukuran <2 cm, T₂ terbatas pada pankreas dan berukuran >2 cm, T₃ meluas ke duodenum (usus dua belas jari) atau saluran empedu, T₄ meluas ke vena porta, vena mesenterika anterior, arteri mesenterika superior, lambung, limpa dan kolon. Nodul N₀ tidak ada metastasis kelenjar limpa regional, N₁ metastasis kelenjar limpa regional. Metastasis M₀ tidak ada metastasis jauh, M₁ metastasis jauh (hati, paru) (Sudoyo, et al. 2009).

Tabel 3. Stadium Kanker Pankreas (COMPTON et al., 2012)

Stadium	Tumor	Nodul	Metastasis
IA	T ₁	N ₀	M ₀
IB	T ₂	N ₀	M ₀
IIA	T ₃	N ₀	M ₀
IIB	T ₁₋₃	N ₁	M ₀
III	T ₄	N ₀₋₁	M ₀
IV	T ₁₋₄	N ₀₋₁	M ₁

C. Senyawa Boron

Boron merupakan unsur yang unik dan menarik, karena satu-satunya unsur nonlogam dalam golongan 13 pada tabel periodik unsur. Boron mempunyai sifat kemiripan dengan unsur karbon dan silikon. Kemiripan sifat ini dalam hal pembentukan senyawa kovalen dan senyawa rantai, namun berbeda dalam pembentukan senyawa kekurangan elektron. Boron tidak pernah dijumpai sebagai senyawa kationik karena tingginya entalpi ionisasi, tetapi membentuk senyawa kovalen dengan pembentukan orbital hibrida sp^2 untuk menghasilkan struktur segitiga sama sisi (Sugiyarto 2013).

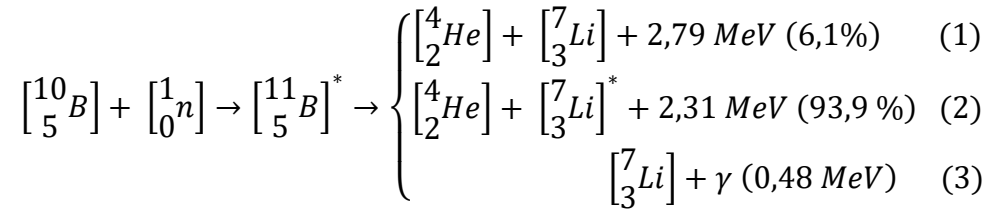
Boron alamiah mengandung sekitar 20 % fraksi atom boron-10 ($^{10}_5\text{B}$) dan sisanya sekitar 80% fraksi atom boron-11 ($^{11}_5\text{B}$). Boron-10 memiliki tampang lintang serapan neutron termal yang lebih tinggi yaitu 3863,7 barn. Dengan demikian, boron-10 sangat mudah menyerap neutron berenergi rendah (neutron termal) (Sardjono 2015).

D. Boron Neutron Capture Therapy

Gagasan klinis teknik *Boron Neutron Capture Therapy* (BNCT) telah dimulai sejak tahun 1936 oleh Gordon Locher. Gagasan ini muncul setelah

penemuan neutron oleh Chadwick dan penjabaranampang lintang dari isotop ^{10}B untuk menangkap neutron termal oleh Goldhaber pada tahun 1934. Menurut Gordon Locher jika boron dapat dipusatkan secara selektif pada volume tumor yang kemudian terpapar neutron termal, maka dosis radiasi yang lebih tinggi pada tumor dibandingkan dengan jaringan normal di sekitarnya akan terjadi (Kortesniemi, 2002). Hal utama dalam BNCT adalah memusatkan obat boron ke dalam tumor yang dilakukan dengan cara selektif dibandingkan dengan mengarahkan sinar seperti pada terapi sinar eksternal konvensional. Boron dapat dimasukkan kepada tubuh pasien dengan cara disuntikan sebelum dilakukan proses penyinaran. Setelah boron terakumulasi di sel kanker melalui pembuluh darah. Maka, selanjutnya dapat dilakukan proses penyinaran. Di situlah letak dasar pemikiran penerapan konsep BNCT secara klinis (IAEA, 2001).

Boron Neutron Capture Therapy adalah teknik terapi radiasi dengan menggunakan nuklida nonradioaktif ^{10}B untuk menangkap neutron termal sehingga menghasilkan reaksi nuklir cepat/ prompt $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$. Produk dari reaksi ini memiliki karakteristik *Linear Energi Transfer* (LET) yang tinggi. LET merupakan jumlah energi rata-rata yang ditransfer atau diberikan pada medium yang dilalui oleh partikel sumber radiasi persatuan panjang. Nilai partikel alfa adalah $150 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$ dan nukleus ^7Li $175 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$. Panjang jalur partikel-partikel ini dalam air atau jaringan berkisar antara 4,5-10 μm , sehingga dapat menghasilkan deposisi energi yang terbatas pada diameter sel tunggal (Sauerwein, 2012). Reaksi dalam BNCT digambarkan sebagai berikut:



Setelah menyerap neutron, boron-10 berubah menjadi boron-11 dan kemudian mengalami eksitasi menjadi lithium-7 (${}^7_3\text{Li}$) dan alfa (${}^4_2\text{He}$). Sekitar 6,1% pembelahan boron-11 menghasilkan ${}^7_3\text{Li}$ dalam kondisi *ground state* dengan menghasilkan energi 2,79 MeV. Sisa 93,9% pembelahan boron-11 menghasilkan ${}^7_3\text{Li}$ dalam kondisi tereksitasi dengan pelepasan energi sebesar 2,31 MeV. Lithium-7 tereksitasi kembali menuju kondisi *ground state* dengan memancarkan sinar gama dengan energi 0,48 MeV (Sardjono 2015).

Pada BNCT, ada tiga faktor penting yang harus diperhatikan agar terapi kanker dapat berhasil. Tiga faktor itu adalah sumber neutron yang digunakan dalam iradiasi, agen pembawa boron, dan dosis radiasi yang dihasilkan (Rosidah et al., 2017).

1. Agen Pembawa Boron

Persyaratan agen pengiriman boron dalam BNCT adalah: toksisitas sistemik rendah dan penyerapan jaringan normal yang rendah sedangkan serapan tumor tinggi, Konsentrasi tumor paling sedikit $\sim 20 \mu\text{g } {}^{10}\text{B/g}$ tumor, dapat bersih cepat dari darah, jaringan normal dan tumor selama BNCT (MIYATAKE et al., 2016). Pada tahun 1950-1960 agen boron yang digunakan di BNCT adalah asam borat dan beberapa turunannya yang bukan merupakan agen selektif yang baik serta memiliki

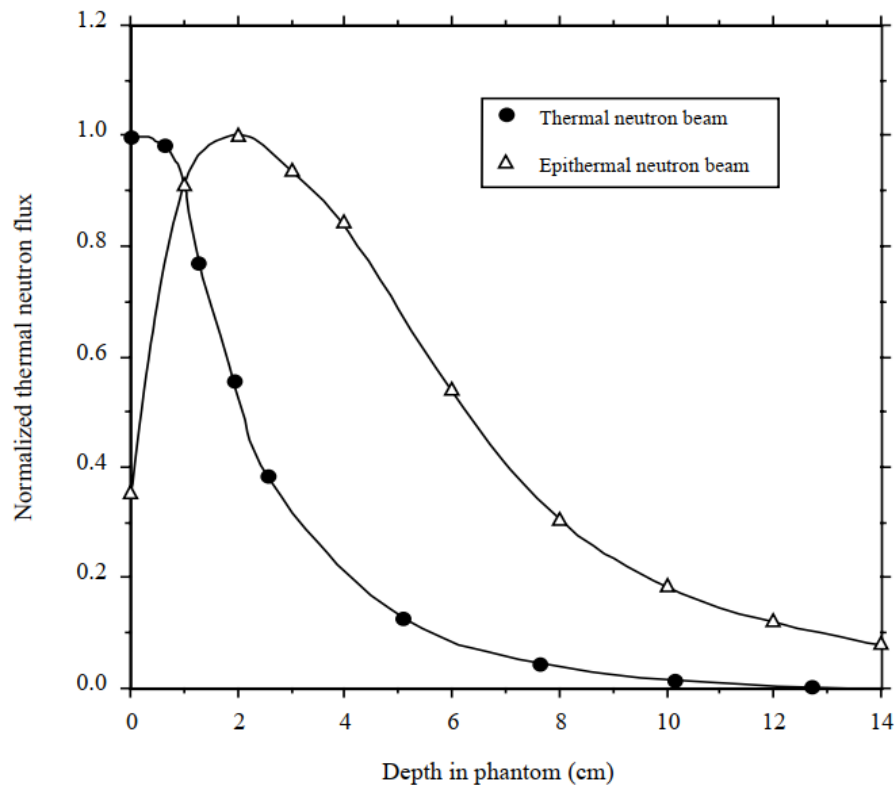
retensi tumor yang sedikit (Nedunchezian, 2016). Tahun 1960an dikembangkan agen generasi kedua untuk mengatasi kelemahan generasi pertama. Agen generasi kedua yang digunakan di BNCT yaitu BPA ($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{H}_{10}$) dan BSH ($\text{Na}_2\text{B}_{12}\text{H}_{11}\text{SH}$) (Nedunchezian, 2016). Agen generasi kedua saat ini masih digunakan dalam uji klinis dan telah menunjukkan hasil yang baik (Moss, 2014).

Kesulitan utama dalam pengembangan agen pengiriman boron ke dalam tumor adalah untuk mengirimkan dosis boron yang cukup dan lebih tinggi di sel kanker dibandingkan dengan jaringan disekitarnya (Kanygin et al., 2017). Sehingga dikembangkan agen pengiriman boron generasi ketiga untuk meningkatkan hasil dari agen pengiriman boron generasi kedua. Agen pengiriman boron generasi ketiga terdiri dari kelompok senyawa boron stabil yang terikat pada fragmen afinitas tumor yang tinggi melalui ikatan stabil hidrolitik (Laurenția dan Rodica, 2016). Mitokondria, lisosom, retikulum endoplasma, aparatus golgi, nukleosida, gula (BPA-fruktosa), porfirin, liposom, polimer, dan monoklonal antibodi (mAb) telah digunakan sebagai bagian penargetan tumor. Senyawa boron generasi ke-3 ini cenderung bekerja lebih spesifik terhadap sel tumor yang ditargetkan, yaitu inti sel tumor dan DNA (Nedunchezian, 2016).

2. Sumber Neutron

Sumber neutron yang digunakan dalam BNCT dapat menggunakan reaktor nuklir atau akselerator. Neutron yang digunakan dalam BNCT harus memiliki jumlah energi yang tepat (Nedunchezian, 2016). Dalam BNCT, neutron termal digunakan untuk bereaksi dengan senyawa boron pada sel kanker. Neutron termal memiliki energi 0,025 eV. Pada sel kanker yang berada lebih dalam dari lapisan

kulit, maka diperlukan neutron yang mampu menembus jaringan kulit yaitu neutron epitermal dengan rentang energi 0,5 eV-10 KeV (Bajoria et al., 2015). Sementara pada sel kanker yang terletak dipermukaan cukup menggunakan neutron termal.



Gambar 2.3 Kurva distribusi fluks neutron termal dan neutron epitermal (IAEA, 2001)

Berdasarkan Gambar 2.3 dapat diketahui bahwa neutron epitermal dapat menembus jaringan dan menghasilkan neutron termal maksimum pada kedalaman 2-3 cm di bawah permukaan kulit dan turun secara eksponensial pada kedalaman selanjutnya. Penetrasi berkas ini bisa ditingkatkan dengan menaikkan energi rerata neutron epitermal dengan ukuran berkas yang kecil. Berbeda dengan neutron epitermal, neutron termal justru turun secara eksponensial sejak dari permukaan. Oleh karena itu, neutron termal sesuai untuk pengobatan kanker pada permukaan kulit (IAEA, 2001).

Sebagian besar berkas neutron epitermal disertai radiasi lain, sehingga baik jaringan sehat maupun tumor dapat mengalami kerusakan jaringan. Maka spektrum energi neutron yang dihasilkan reaktor atau akselerator harus sesuai dengan rekomendasi IAEA agar menghasilkan neutron epitermal yang sampai pada kedalaman tumor untuk waktu iradiasi yang rasional dan seminimal mungkin tidak ada radiasi lain (Arrozaqi, 2013), seperti ditampilkan pada tabel 4 berikut:

Tabel 4. Parameter berkas neutron yang disarankan IAEA (Sauerwein dan Moss, 2009)

Parameter	Notasi (Satuan)	Rekomendasi
Fluks neutron epitermal	$\phi_{epi} (n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1})$	$> 1,0 \times 10^9$
Rasio laju dosis neutron cepat terhadap fluks neutron epitermal	$\dot{D}_f / \phi_{epi} (Gy \cdot cm^2 \cdot n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio laju dosis gamma terhadap fluks neutron epitermal	$\dot{D}_\gamma / \phi_{epi} (Gy \cdot cm^2 \cdot n^{-1})$	$< 2,0 \times 10^{-13}$
Rasio fluks termal terhadap fluks neutron epitermal	ϕ_{th} / ϕ_{epi}	$< 0,05$
Rasio arus neutron terhadap fluks neutron epitermal	I / ϕ_{epi}	$> 0,7$

Nilai fluks neutron epitermal sebesar $1,0 \times 10^9$ n/cm².s dipandang cukup untuk dapat digunakan dalam BNCT. Bisa juga menggunakan berkas dengan intensitas 5×10^8 n/cm².s namun perlu waktu iradiasi yang lebih lama. Dalam neutron cepat, ada berkas radiasi lain yang tidak diinginkan dikarenakan karakteristiknya, seperti proton dengan LET tinggi dan radikal bebas. Neutron cepat berenergi lebih dari 10 KeV. Sehingga rasio laju dosis neutron cepat terhadap fluks neutron epitermal harus diminimalkan. Karena sinar gama tidak hanya menyinari volume target melainkan juga jaringan sehat disekitarnya, maka komponen ini

harus dihilangkan. Karena disamping dari reaktor, gama juga akan dihasilkan melalui reaksi (n,γ) di dalam tubuh pasien. Pada volume target, nilai yang diijinkan adalah $2 \times 10^{-13} \text{ Gy cm}^2$ per neutron epitermal (Arrozaqi, 2013).

Untuk mengurangi kerusakan pada permukaan kulit, maka rasio fluks termal terhadap fluks neutron epitermal harus diminimalisir. Rasio fluks neutron termal dan epitermal harus kurang dari 0,05. Nilai rasio arus neutron terhadap fluks neutron epitermal yang disarankan untuk poin ini adalah lebih besar dari 0,7. Hal ini untuk membatasi divergensi berkas neutron. Semakin besar nilai rasio tersebut maka berkas neutron yang keluar dari kolimator semakin koheren (Arrozaqi, 2013 ; Sardjono 2015).

3. Dosis BNCT

Tindakan mengukur atau memperkirakan dosis radiasi dan menetapkan nilai dosis tersebut, dikenal sebagai dosimetri (Canadian Nuclear Safety Commission, 2012). Saat radiasi pengion menembus materi, seperti tubuh manusia, maka akan terjadi interaksi energi dengan materi. Kuantitas yang digunakan untuk mengukur jumlah radiasi pengion dikenal sebagai dosis serap atau biasanya hanya disebut sebagai dosis. Dosis serap merupakan energi yang diserap per satuan massa. Dosis serap dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$D_s = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (4)$$

Keterangan :

D_s : dosis serap (Gy)

$d\bar{\epsilon}$: energi (J)

dm : massa (Kg)

Probabilitas efek stokastik pada jaringan tubuh yang menerima radiasi dengan dosis serap yang sama dan jenis radiasi yang berbeda adalah tidak sama. Hal ini didefinisikan sebagai nilai *Relative Biological Effectiveness* (RBE). Dosis yang memperhitungkan nilai RBE didefinisikan sebagai nilai dosis ekuivalen, yang merupakan hasil perkalian dosis serap dengan nilai RBE. Persamaan nilai dosis ekuivalen adalah sebagai berikut:

$$\text{Dosis Ekuivalen } (D_E) = \text{Dosis Serap } (D_S) \times RBE \quad (5)$$

Nilai RBE menunjukkan besarnya efek biologis pada suatu organ tertentu setelah menyerap sejumlah energi radiasi dibandingkan dengan efek biologis yang dihasilkan oleh radiasi sinar X berenergi 250 kV yang diserap organ tersebut dengan jumlah energi yang sama (Sardjono 2015). Nilai RBE dari berbagai jenis radiasi dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Nilai RBE dari berbagai jenis radiasi (Sardjono 2015)

Jenis Radiasi	RBE	Jenis Radiasi	RBE
Neutron ($E \leq 0,005$ KeV)	5	Neutron ($E \geq 20$ MeV)	5
Neutron ($0,005$ KeV $< E \leq 10$ KeV)	5	Proton ($E > 2$ MeV)	2-5
Neutron (10 KeV $< E \leq 100$ KeV)	10	Gama (semua energi)	1
Neutron (100 KeV $< E \leq 2$ MeV)	20	Alfa	20
Neutron (2 MeV $< E \leq 20$ MeV)	10	Sinar x	1

Nilai dosis untuk terapi BNCT dihitung sebagai jumlah dari dosis utama dan dosis radiasi ikutan. Dosis utama dari terapi BNCT adalah dosis boron. Dosis boron

merupakan dosis yang berasal dari pembelahan boron-11 yang tereksitasi menjadi partikel alfa dan lithium-7. Dosis radiasi ikutan meliputi dosis proton, dosis neutron, dan dosis gama. Nilai faktor biologis yang digunakan dalam perhitungan dosimetri BNCT dapat dilihat pada tabel 6.

Tabel 6. Nilai faktor bobot biologis pada perhitungan dosimetri BNCT (Sardjono 2015)

Perhitungan Dosis	Faktor bobot biologis
Boron (alfa dan lithium)	3,8 (tumor atau kanker)
	1,3 (jaringan sehat)
Proton	3,2
Neutron hamburan	3,2
Gama	1

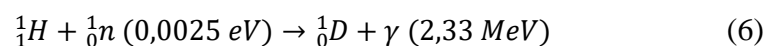
Berikut penjelasan keempat dosis dalam BNCT:

a. Dosis Boron

Dosis boron berasal dari interaksi antara neutron termal dan senyawa boron yang disuntikkan ke dalam jaringan kanker. Reaksi antara neutron termal dan boron-10 dalam jaringan memiliki kemungkinan paling tinggi untuk menangkap neutron termal, karena boron memiliki tangkapan neutron termal yang tinggi dibandingkan dengan unsur lain, yaitu 3835 barn (Rosidah et al., 2017).

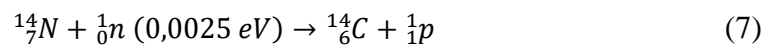
b. Dosis Gama

Dosis gama terjadi karena hidrogen dalam jaringan menyerap neutron termal dalam reaksi ${}^1\text{H}(n,\gamma){}^2\text{H}$ dan memancarkan sinar gama 2,33 MeV (IAEA, 2001). Persamaan reaksinya adalah sebagai berikut:



c. Dosis Proton atau Dosis Nitrogen

Nitrogen-14 memiliki fraksi massa yang cukup tinggi yaitu 4,5% dari massa jaringan tubuh (Irhas, 2014). Interaksi neutron termal dengan Nitrogen-14 (^{14}N) menghasilkan Karbon-14 (^{14}C) dan proton dengan energi 0,66 MeV. Reaksi ^{14}C (n, p) ^{14}N dituliskan dalam persamaan berikut (IAEA, 2001) :



d. Dosis Hamburan Neutron

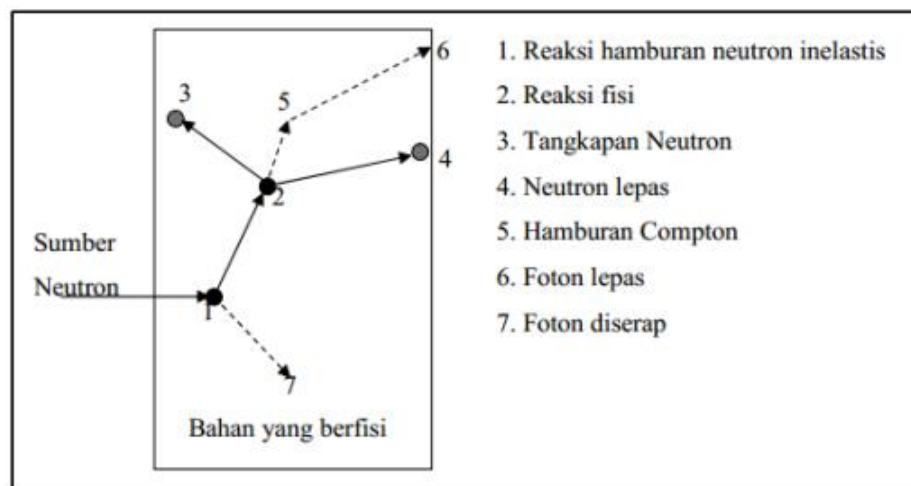
Reaksi interaksi neutron cepat dan neutron epitermal dengan jaringan tubuh dapat disebut interaksi hamburan neutron (Irhas, 2014). Dosis hamburan neutron dihasilkan oleh hidrogen dalam jaringan menyerap neutron epitermal dan cepat pada reaksi $^1\text{H}(\text{n},\text{n}')\text{p}$ yang menghasilkan energi yang tersimpan secara lokal dari rekoil proton (IAEA, 2001). Persamaan hamburan neutron dituliskan sebagai berikut:



E. Metode Monte Carlo : PHITS

Monte Carlo merupakan metode yang digunakan untuk mensimulasikan suatu proses stokastik. Metode Monte Carlo dapat digunakan untuk menduplikasi proses statistik (seperti interaksi partikel dengan bahan nuklir) dan berbagai masalah kompleks yang tidak dapat dikerjakan dengan metode deterministik (Athiqoh et al., 2014). Metode monte carlo dapat digunakan sebagai pendekatan probabilistik terhadap kemungkinan interaksi yang akan terjadi pada radiasi. Monte

Carlo menentukan nilai yang diinginkan dengan melakukan simulasi terhadap masing-masing partikel dan mencatat hal yang sesuai dengan karakteristik partikel dan media yang dilewatinya (Irhas, 2014).



Gambar 2.4 Probabilitas interaksi neutron dengan materi (Darsono et al., 2013).

Gambar 2.4 memperlihatkan kebolehjadian sebuah neutron dari sebuah sumber acak di dalam sebuah lempeng material yang mengalami reaksi pembelahan. Neutron yang menembus materi sampai pada posisi (1), merupakan posisi acak yang dipilih sebagai tempat interaksi mula-mula antar neutron dengan materi. Interaksi yang terjadi adalah hamburan inelastis ($n,2n$), foton yang terbentuk diabaikan terlebih dahulu untuk analisis lebih lanjut. Neutron mengalami reaksi pembelahan (2), menghasilkan 2 buah neutron baru dan sebuah foton. Salah satu neutron hasil pembelahan (3) ditangkap oleh material lalu berhenti. Neutron yang lain (4) bergerak keluar medium. Foton hasil pembelahan (5) mengalami peristiwa tumbukan dengan medium kemudian bergerak keluar lempeng medium (6). Partikel yang mengalami penundaan analisis paling akhir akan dianalisis pertama kali sesudah penundaan (Darsono et al., 2013).

Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS) adalah salah satu program komputer berbasis metode Monte Carlo yang dikembangkan oleh Japan Atomic Energy Agency (JAEA) yang memiliki kemampuan untuk mensimulasikan partikel dengan beragam material dan rentang energi yang luas (Niita et al., 2006). Energi transport pada PHITS hingga 1 TEV (per nukleon untuk ion) dengan menggunakan beberapa model reaksi nuklir dan data pustaka. Kode program PHITS ditulis dalam bahasa Fortran (Sato et al., 2018). Program PHITS dikembangkan oleh beberapa institusi seperti *Research Organization for Information Science and Technology* (RIST), *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA), *High Energy Accelerator Research Organization* (KEK), dan Chalmers University. PHITS telah digunakan untuk berbagai bidang penelitian seperti ilmu radiasi, akselerator dan desain perisai, penelitian ruang angkasa, aplikasi medis, penelitian material, dan sebagainya (Niita et al., 2011).

Deposisi panas, panjang lintasan dan hasil produksi dapat disimpulkan dari simulasi PHITS, dengan menggunakan fungsi estimator atau disebut sebagai “*tally*”. Kode ini juga memiliki fungsi untuk menggambar 2D dan 3D dari hasil perhitungan. PHITS dapat dijalankan di hampir semua komputer (Windows, Mac dan Linux) (Sato et al., 2013).

F. Kerangka Berpikir

Pengobatan BNCT merupakan metode dengan memanfaatkan senyawa boron yang dibawa oleh agen pembawa boron kedalam sel kanker yang kemudian ditembakkan sumber neutron untuk membunuh sel kanker. Sebelum dilakukan

proses pengobatan, maka perlu dilakukan suatu uji pra klinis salah satunya dengan membuat suatu simulasi terapi BNCT. Simulasi dilakukan agar mendapatkan nilai konsentrasi boron dan waktu iradiasi yang efektif selama proses terapi. Pada penelitian ini dilakukan untuk membuat simulasi terapi BNCT pada sel kanker di organ pankreas dengan memanfaatkan sumber neutron dari Reaktor Kartini.

Penelitian diawali dengan membuat bentuk geometri jaringan kanker, pankreas, lambung, limpa, rusuk, hati, dan kulit di program PHITS. Pada geometri dimasukan nilai konsentrasi boron, konsentrasi boron yang digunakan adalah $100\mu\text{g/g}$, $110\mu\text{g/g}$, $120\mu\text{g/g}$, $130\mu\text{g/g}$, $140\mu\text{g/g}$, $150\mu\text{g/g}$. Jaringan kanker mendapatkan konsentrasi boron yang lebih besar dibandingkan jaringan sehat dengan perbandingan 10:1. Bentuk geometri tersebut kemudian dilewatkan sumber neutron dan direkam program PHITS. Hasil dari program PHITS berupa laju dosis hamburan neutron dan fluks neutron. Nilai fluks neutron digunakan untuk menghitung nilai laju dosis yang lain, seperti: dosis boron, proton, dan gama. Keempat nilai laju dosis tersebut digunakan untuk menghitung waktu iradiasi dan nilai dosis serap. Waktu iradiasi didapatkan dengan membagi dosis standar atau dosis minimal merusak sel kanker dengan laju dosis total jaringan kanker. Nilai dosis serap didapatkan dengan mengalikan waktu iradiasi dengan laju dosis total.

BAB III

METODE PENELITIAN

A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2018 sampai Juli 2018 dengan hasil berupa dosis serap total BNCT pada kanker pankreas. Penelitian ini dilakukan di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, Badan Tenaga Nuklir Nasional (PSTA BATAN) Yogyakarta dan Laboratorium Komputasi Fisika FMIPA UNY.

B. Instrumen Penelitian

Instrumen yang digunakan untuk membuat simulasi ini adalah:

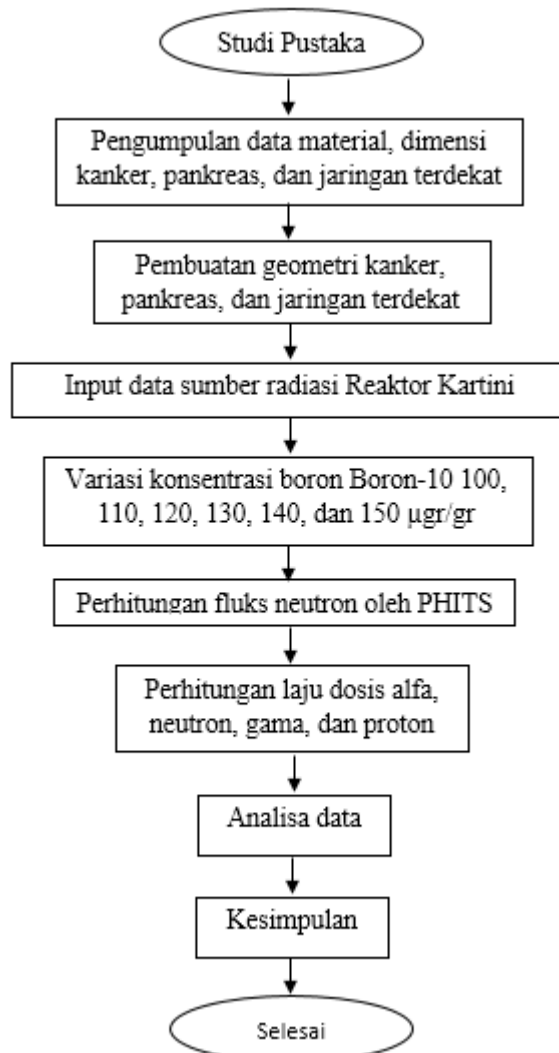
1. Perangkat Keras

Satu unit Komputer Portable Dell seri Inspiron N4050 dengan spesifikasi prosesor Intel(R) core(TM) i3-2330M CPU @2,20GHz, Memori (RAM) 4,00 GB, dan Jenis Sistem Operasi Windows 10 Pro 32-bit.

2. Perangkat Lunak

- a. Particle Heavy and Ion Transport Code System (PHITS) versi 2.81 yang digunakan untuk simulasi reaksi nuklir dalam jaringan.
- b. Notepad++ yang digunakan untuk menuliskan program
- c. Microsoft Excel 2013 yang digunakan untuk menganalisis data keluaran PHITS.

C. Alur Penelitian



Gambar 3.1 Alur Penelitian

D. Data Geometri

Pemodelan geometri menggunakan model phantom *Oak Ridge National Library* (ORNL) pria dewasa (Krstic, D., Nikezic, 2006). *Phantom* ini awalnya dibuat di MCNP4B tetapi dimodifikasi agar dapat digunakan di program PHITS tanpa merubah bentuk dan ukuran. Organ-organ yang dibuat dalam penelitian ini adalah pankreas, badan, lambung, limpa, hati, dan kanker.

Jaringan kanker disimulasikan berbentuk bola berdiameter 1,8 cm yang terdiri dari *Gross Tumour Volume* (GTV), *Clinical Tumour Volume* (CTV), dan *Planned Tumour Volume* (PTV). Kanker terletak pada ekor jaringan pankreas pada 5,8 cm dari permukaan kulit. Stadium kanker pankreas IA yang masih terletak pada pankreas dan belum bermetastasis.

E. Data Material

Material-material dalam geometri yang digunakan mengikuti material-material pada jaringan tubuh manusia. Material-material ini berdasarkan *compendium of material composition data for radiation transport modeling* yang dibuat oleh *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) (McConn Jr RJ, 2011). Berikut adalah daftar unsur-unsur material yang akan digunakan untuk simulasi penelitian ini:

Tabel 7. Fraksi massa unsur-unsur material geometri (McConn Jr RJ, 2011)

Unsur	Kode PHITS	Fraksi Massa			
		Jaringan Kanker	Jaringan Lunak	Tulang	Kulit
H	1001	0,099	0,104472	0,100637	0,100588
C	6012	0,269	0,232190	0,10783	0,22825
N	7014	0,045	0,024880	0,02768	0,04642
O	8016	0,569	0,630238	0,754773	0,619002
Na	11023	-	0,001130	0,00075	0,00007
Mg	12024	-	0,000130	0,00019	0,00006
P	15031	0,018	0,001330	0,0018	0,00033
S	16032	-	0,001990	0,00241	0,00159
Cl	17035	-	0,001340	0,00079	0,00267
K	19039	-	0,001990	0,00302	0,00085
Ca	20040	-	0,000230	0,00003	0,00015
Fe	26056	-	0,000050	0,00004	0,00001
Zn	30065	-	0,000030	0,00005	0,00001

F. Variabel Penelitian

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian ini adalah berupa konsentrasi boron yang dimasukan dalam jaringan kanker dengan berbagai variasi konsentrasi. Dalam BNCT batas maksimal konsentrasi boron yang diinjeksikan adalah 150 $\mu\text{g/g}$ kanker, ini untuk menghindari kelebihan kandungan boron dalam tubuh yang dibawa oleh unsur makanan (Rahmawati & Darmawan, 2014). Pada jarak kanker yang dekat dengan permukaan kulit dengan menggunakan konsentrasi boron yang rendah sudah efektif untuk merusak sel kanker tetapi pada jarak yang lebih dari 3 cm dari permukaan kulit laju dosis yang dihasilkan tidak begitu maksimal untuk merusak sel kanker.

Pada penelitian ini jarak kanker dengan permukaan kulit sebesar 5,8 cm sehingga menggunakan konsentrasi boron yang cukup besar untuk merusak sel kanker. Variasi konsentrasi boron yang digunakan dalam penelitian ini 100 $\mu\text{g/g}$, 110 $\mu\text{g/g}$, 120 $\mu\text{g/g}$, 130 $\mu\text{g/g}$, 140 $\mu\text{g/g}$, 150 $\mu\text{g/g}$. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah laju dosis dan waktu iradiasi.

G. Penggunaan PHITS

1. Input PHITS

Data masukan atau input dibuat di notepad++ dan disimpan dengan ekstensi *.inp. Data masukan atau input PHITS di notepad++ terdiri dari *title section*, *parameter section*, *source section*, *material section*, *surface section*, *cell section*, dan *tally section*. Berikut penjelasan setiap bagian:

a. *Title Section*

Bagian ini berisi judul atau keterangan program kerja yang sedang dijalankan. Jumlah baris judul tidak dibatasi.

b. *Parameter Section*

Pada bagian parameter berisi pengaturan-pengaturan program PHITS seperti: mode kalkulasi, jumlah *history bank*, energi *cut off*, dan opsi untuk file output.

c. *Source Section*

Pada bagian ini mendefinisikan partikel yang ditembakkan sebagai sumber radiasi atau sumber energi. Sumber energi dapat berupa *single source* ataupun *multi source*.

d. *Material Source*

Material berisi unsur penyusun suatu objek atau geometri. Bagian material didefinisikan oleh nomor material, elemen (nuklida), dan densitas. Formatnya adalah sebagai berikut:

[Material]

MAT[m]

Nukleus densitas

Nukleus densitas

Pada MAT[m], dimana m adalah nomor material. Nomor material dimulai dari 1-99999.

e. Surface Section

Surface digunakan untuk mengatur dan membuat bentuk geometri dengan persamaan matematis pada *cell section*. Format penulisan *surface section* adalah sebagai berikut:

[*Surface*]

Surface number transform number surface symbol surface definition

Tabel 8. Deskripsi format penulisan *surface*

Item	Deskripsi
<i>Surface number</i>	Nomor <i>surface</i> dimulai 1-999999
<i>Coordinate transform number</i>	Jika tidak terdapat transformasi maka tidak ada input. Jika ada, menggunakan nomor transformasi n pada <i>transform section</i>
<i>Surface symbol</i>	Simbol <i>surface</i> pada daftar <i>surface section</i>
<i>Surface definition</i>	1 ~ 15 input bergantung pada jenis <i>surface</i>

Tabel 9. Daftar *surface* pada PHITS

Simbol	Jenis	Deskripsi	Persamaan	Input
P	Bidang	Umum	$A_x + B_y - C_z - D = 0$	ABCD
PX		Tegak lurus sb X	$x - D = 0$	D
PY		Tegak lurus sb Y	$y - D = 0$	D
PZ		Tegak lurus sb Z	$z - D = 0$	D
SO	Bola	Titik pusat Umum	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
SX		Titik pusat sb X	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}R$
SY		Titik pusat sb Y	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{y}R$
SZ		Titik pusat sb Z	$x^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{z}R$
C/X	Silinder	Paralel sb X	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{y}\bar{z}R$
C/Y		Paralel sb Y	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{z}R$

Simbol	Jenis	Deskripsi	Persamaan	Input
C/Z CX CY CZ	Silinder	Paralel sb Z Pada sb X Pada sb Y Pada sb Z	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$ $y^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + z^2 - R^2 = 0$ $x^2 + y^2 - R^2 = 0$	$\bar{x}\bar{y}R$ R R R
SQ	Ellips, hiperbola	Paralel sumbu X, Y, Z	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 - C(z - \bar{z})^2 + 2D(x - \bar{x})^2 + 2E(y - \bar{y})^2 + 2F(z - \bar{z})^2 + G = 0$	ABCDE FG $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$

a. Cell Section

Pada bagian ini mendefinisikan ruang tertutup yang dibatasi bentuk-bentuk *surface* dan berisi material. Format penulisan *cell section* sebagai berikut:

[Cell]

Cell number mat. number mat. density cell. def. cell parameter

Tabel 10. Deskripsi penulisan *cell section*

Item	Deskripsi
<i>Cell number</i>	Nomor sel dari 1-999999
<i>Material number</i>	Daerah <i>void</i> didefinisikan 0 dan -1 untuk daerah diluar perhitungan.
<i>Material density</i>	Jika sel adalah <i>void</i> dan daerah luar maka tidak memasukan kerapatan material. Jika kerapatan material bernilai positif menggunakan kerapatan atomik (10^{24} atom/cm ³) dan kerapatan material bernilai negatif menggunakan massa jenis (g/cm ³).
<i>Cell definition</i>	Geometri sel didefinisikan dengan menggabungkan nomor <i>surface</i> dengan operator boolean.

f. Tally Section

Bagian tally berisi perintah-perintah untuk perhitungan pada simulasi. PHITS mempunyai berbagai tally untuk proses perhitungan seperti yang ditampilkan pada tabel 11.

Tabel 11. Jenis-jenis tally PHITS

Nama	Deskripsi
[t-track]	Definisi tally panjang jejak
[t-cross]	Definisi penampang permukaan
[t-heat]	Definisi tally perkembangan panas
[t-deposit]	Definisi tally deposit
[t-deposit2]	Definisi tally deposit2
[t-yield]	Definisi tally sisa hasil nuklei
[t-product]	Definisi tally partikel yang diproduksi
[t-dpa]	Definisi tally DPA
[t-let]	Definisi tally LET
[t-sed]	Definisi tally SED
[t-time]	Definisi tally waktu
[t-star]	Definisi tally densitas star
[t-dchain]	Definisi tally Chain
[t-userdefined]	Definisi tally yang ditetapkan pengguna
[t-gshow]	Definisi tampilan daerah permukaan untuk plot grafis
[t-rshow]	Definisi tampilan daerah kuantitas fisik untuk plot grafis
[t-3dshow]	Definisi plot geometri grafis 3D

2. Running PHITS

Data masukan PHITS disimpan dalam notepad++ dengan format *.inp. Running phits dilakukan melalui command prompt (cmd) dengan cara klik kanan file *.inp pilih send to PHITS. Contoh running PHITS seperti pada gambar 3.2.

```

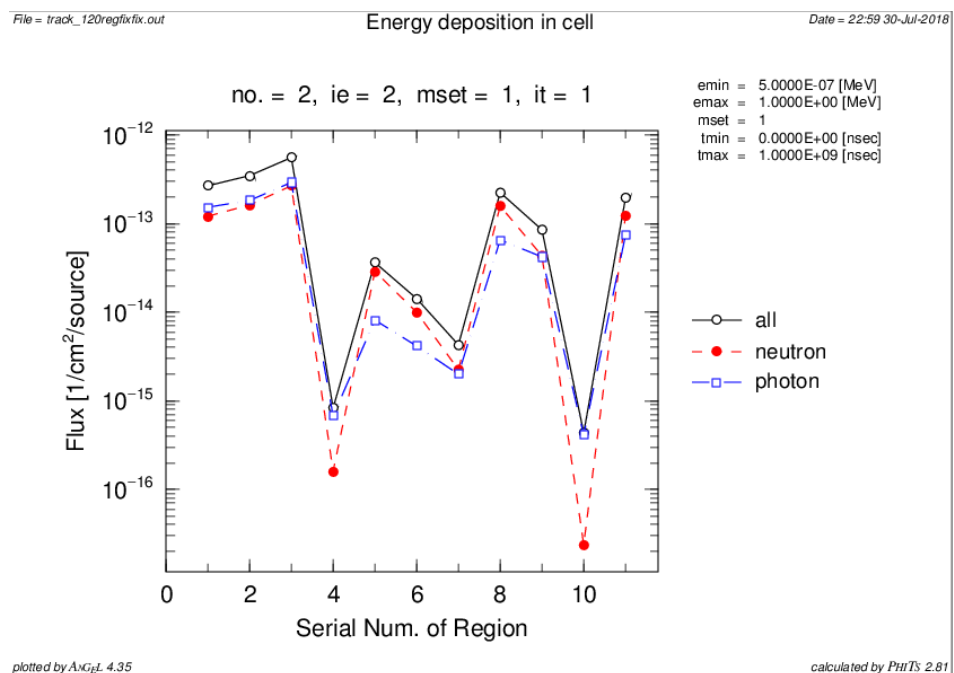
PHITS: "D:\kuliah\seminar penelitian\BNCT pankreas\SKRIPSI\fix fix\BNCT_pankreas150oke....
Started at 10/08/2018 10.36.27,57, input= "BNCT_pankreas150oke.inp"
** warning : in [transform] section,
non-orthogonality of transformation.
transform id = 5: r = 0.96E-05 > 2.e-6
** warning : in [transform] section,
non-orthogonality of transformation.
transform id = 60: r = 0.71E+00 > 2.e-6
bat[ 1] ncas = 1000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 36m 49
bat[ 2] ncas = 2000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 36m 54
bat[ 3] ncas = 3000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 00
bat[ 4] ncas = 4000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 09
bat[ 5] ncas = 5000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 18
bat[ 6] ncas = 6000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 25
bat[ 7] ncas = 7000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 30
bat[ 8] ncas = 8000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 39
bat[ 9] ncas = 9000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 46
bat[10] ncas = 10000. : date = 2018-08-10 : time = 10h 37m 52
Finished at 10/08/2018 10.38.12,48
Press any key to continue . . .

```

Gambar 3.2 Contoh *running* PHITS

3. Output PHITS

Output PHITS tersimpan dalam file berekstensi *.out. output PHITS berisi hasil perhitungan sesuai dengan perintah tally yang digunakan. Hasil program PHITS juga dapat ditampilkan dalam bentuk grafik.



Gambar 3.3 Contoh keluaran grafik PHITS

H. Teknik Analisis Data

Komponen dosis dalam BNCT terdiri dari empat nilai dosis yaitu: dosis boron, dosis gama, dosis proton dan dosis hamburan neutron. Nilai laju dosis hamburan neutron dapat langsung diketahui dari keluaran PHITS. Hasil keluaran dari PHITS kemudian diolah dengan menggunakan Microsoft Excel untuk mendapatkan nilai laju dosis yang lain.

1. Perhitungan Jumlah Atom dalam Jaringan

Perhitungan atom dalam jaringan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned}n_i &= \frac{m_i}{Ar_i} \\N_i &= n_i \times N_A \\N_{i-jaringan} &= \frac{N_i}{m_{jaringan}}\end{aligned}\tag{10}$$

keterangan :

n_i : mol unsur i (mol)

m_i : massa unsur i (g)

$m_{jaringan}$: massa jaringan target (kg).

Ar_i : nomor massa unsur i (g/mol)

N_i : jumlah nuklida unsur i (atom)

N_A : konstanta *Avogadro* ($6,023 \times 10^{23}$ atom/mol)

$N_{i-jaringan}$: jumlah nuklida unsur i dalam satu kilogram jaringan (atom/kg jaringan)

2. Perhitungan Laju Dosis BNCT

Laju dosis yang akan dihitung dalam penelitian ini adalah laju dosis total yang terdiri atas jumlah keseluruhan dari faktor kualitas radiasi dari suatu sumber (w) yang dikalikan dengan laju dosis dari suatu sumber radiasi. Sumber radiasi

terdiri dari boron, proton, gama, dan neutron. Persamaan laju dosis total adalah sebagai berikut:

$$\dot{D}_{Total} = (w_{boron} \times \dot{D}_{boron}) + (w_p \times \dot{D}_p) + (w_n \times \dot{D}_n) + (w_\gamma \times \dot{D}_\gamma) \quad (11)$$

Keterangan :

w_{boron} : Faktor bobot radiasi dari boron

w_p : Faktor bobot radiasi dari proton

w_n : Faktor bobot radiasi dari neutron

w_γ : Faktor bobot radiasi dari gama

Untuk memperoleh laju dosis dari setiap sumber maka akan dijelaskan sebagai berikut :

a. Dosis Boron

Laju dosis boron merupakan hasil interaksi boron dengan neutron termal. Reaksi tersebut menghasilkan energi rerata (Q) 2,33 MeV. Perhitungan laju dosis dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{D}_{boron} = \frac{\Phi N_{B-10-jaringan} \sigma_{a,B-10} Q \times 1,6 \times 10^{-13} J/MeV}{1 \frac{J/kg}{Gy}} \quad (12)$$

Keterangan :

\dot{D}_{boron} : laju dosis boron (Gy/detik)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{B10-jaringan}$: jumlah atom Boron per kg jaringan (atom/kg jaringan)

$\sigma_{a,B-10}$: tampang lintang mikroskopik serapan Boron 10 (cm²)

Q : energi partikel (MeV)

b. Dosis Proton

Laju dosis proton merupakan hasil interaksi tangkapan antara neutron dengan nitrogen. Reaksi tersebut menghasilkan karbon-14 dan proton dengan energi (Q) 0.66 MeV. Perhitungan laju dosis dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\dot{D}_{proton} = \frac{\Phi N_{N-jaringan} \sigma_{a,N} \times Q \cdot 1,6 \times 10^{-13} J/MeV}{1 \frac{J/kg}{Gy}} \quad (13)$$

keterangan :

\dot{D}_{proton} : laju dosis proton (Gy/s)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{N-jaringan}$: jumlah atom nitrogen per kg jaringan (atom/kg jaringan)

$\sigma_{a,N}$:ampang lintang mikroskopik serapan Nitrogen (cm²)

Q : energi partikel (MeV)

c. Dosis Gama

Interaksi antara Hidrogen-1 dengan neutron termal akan menghasilkan laju hidrogen-2. Laju pembentukan hidrogen-2 ini setara dengan laju pelepasan gamma dengan energi 2,23 MeV. Laju pembentukan gamma dihitung mengikuti persamaan berikut:

$$\ddot{R} = \Phi \cdot N_{H-jaringan} \cdot \sigma_H \quad (14)$$

Keterangan :

\ddot{R} : laju pembentukan Hidrogen-2/ laju pelepasan gama (Bq/ kg)

Φ : fluks neutron termal (neutron.cm⁻².detik⁻¹)

$N_{H-jaringan}$: jumlah atom hidrogen per kg jaringan (atom / kg)

σ_H : tampang lintang serapan neutron termal terhadap hidrogen (cm²)

Perhitungan laju dosis gamma tiap jaringan dengan persamaan berikut :

$$\dot{D}_\gamma = \ddot{R} \Delta \varphi \quad (15)$$

Keterangan :

\ddot{R} : laju pembentukan Hidrogen-2 atau laju pelepasan gama (Bq/ kg)

Δ : kofisien laju dosis serap/ aktivitas spesifik (1,6 x 10⁻¹³ x 2.33

$$\text{MeV}/\gamma = 3,568 \times 10^{-13} \frac{\text{Gy/s}}{\text{Bq/kg}})$$

φ : fraksi dosis serap gama

3. Perhitungan Waktu Iradiasi

Tingkat waktu iradiasi yang efektif pengobatan BNCT diperoleh dengan membandingkan dosis standar dengan laju dosis serap total pada kanker. Tingkat waktu iradiasi efektif diperoleh melalui persamaan :

$$t_{iradiasi} = \frac{Dosis\ Standar}{laju\ dosis\ radiasi} \quad (16)$$

Keterangan :

$t_{iradiasi}$: waktu iradiasi (detik)

dosis standar : dosis standar yang disarankan 50 Gy

laju dosis radiasi : laju dosis serap total yang diterima oleh jaringan (Gy/s)

4. Perhitungan Dosis Serap

Setelah nilai waktu iradiasi diketahui, selanjutnya menghitung nilai dosis total serap yang diterima. Nilai dosis digunakan untuk mengetahui apakah nilai dosis tersebut tidak melebihi batas dosis yang boleh diterima khususnya pada jaringan sehat. Berikut persamaan perhitungan dosis serap:

$$D_{Serap} = \dot{D} \cdot t_{iradiasi} \quad (17)$$

Keterangan :

D_{Serap} : nilai dosis serap (Gy)

\dot{D} : nilai laju dosis (Gy/detik)

$t_{iradiasi}$: waktu iradiasi (detik)

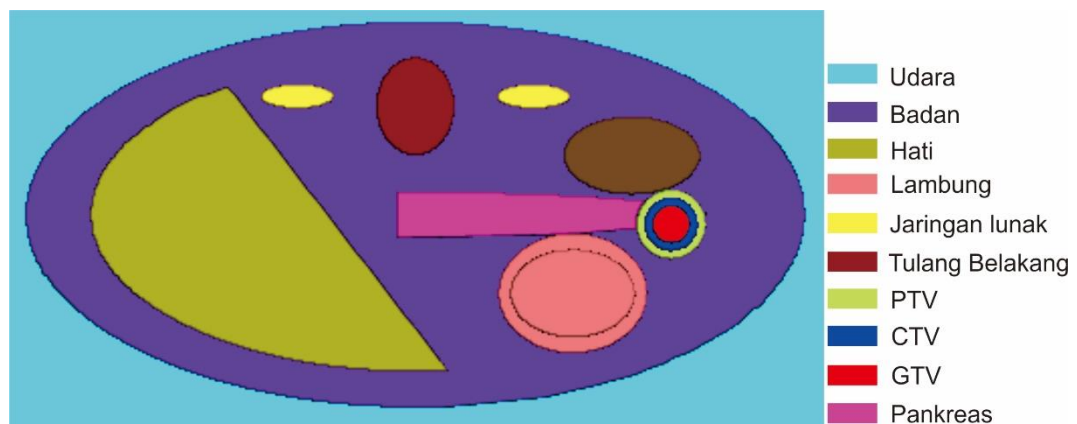
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pemodelan *Phantom*

Phantom yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan model *Oak Ridge National Library* (ORNL) pada pria dewasa (Cristy & Eckerman, 1987). Penelitian ini memodelkan organ pankreas dengan jaringan kanker dan beberapa organ disekitar pankreas.

Jaringan kanker pada pankreas dimodelkan berbentuk bola yang terdiri dari *Gross Tumour Volume* (GTV), *Clinical Tumour Volume* (CTV), dan *Planned Tumour Volume* (PTV) dengan diameter berturut-turut 1,8 cm, 1,4 cm, dan 1 cm. Kanker terletak pada bagian ekor dari organ pankreas. Kanker pankreas berstadium IA yang masih terletak pada pankreas dan belum bermetastasis. Kedalaman dari GTV, CTV, dan PTV berturut-turut sejauh 5,8 cm, 5,4 cm, dan 5 cm dari permukaan kulit.

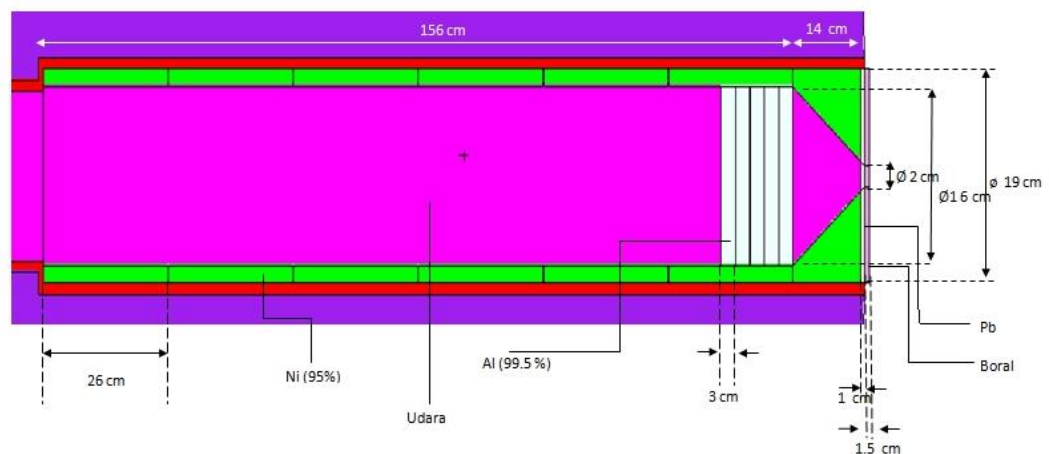


Gambar 4.1 Pemodelan *Phantom*

Gambar 4.1 memperlihatkan model bentuk *phantom* secara tampang lintang dalam penelitian ini. Organ pankreas terletak diantara organ lambung dan limpa. Kanker pankreas berada pada ujung sisi kanan pankreas. Organ hati terletak pada sisi kiri pankreas. Komposisi material phantom menggunakan data *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL), seperti yang terlampir pada tabel 7.

B. Pemodelan Sumber Neutron

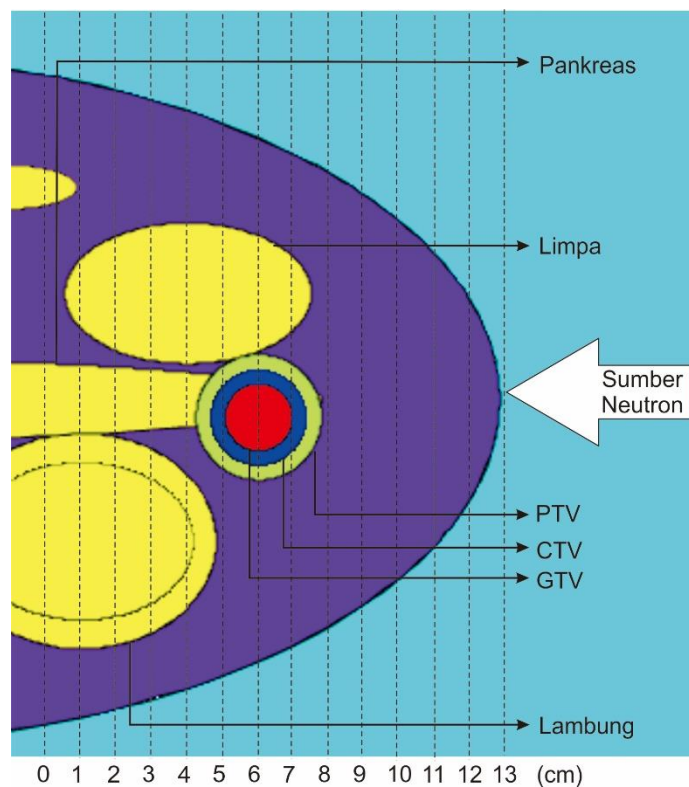
Penelitian ini menggunakan sumber neutron dari Reaktor Kartini yang berdaya 100 kW. Neutron yang digunakan sudah melewati model kolimator khusus BNCT hasil penelitian M. Ilma Muslih Arrozaqi (2013) dan ditunjukkan pada gambar 4.2.



Gambar 4.2. Desain kolimator beam port tembus radial Reaktor Kartini
(Arrozaqi, 2013)

Kolimator ini tersusun dari dinding berbahan nikel (Ni) setebal 1,5 cm dan *aperture* selebar 2 cm. Moderator yang digunakan berbahan Al 1350 dengan

kemurnian 99,5% setebal 15 cm yang terdiri dari 5 blok dengan tebal masing-masing 3 cm. Perisai gama terdiri dari bahan timbal (Pb) setebal 1 cm dan boral setebal 1,5 cm. Keluaran kolimator ini menghasilkan nilai fluks neutron epithermal sebesar $5,03 \times 10^8 \text{ n/cm}^2.\text{s}$, tetapi nilai fluks epithermal yang dihasilkan kolimator ini masih kurang dari yang direkomendasikan IAEA seperti pada tabel 4. Meskipun belum mencapai kriteria, hasil tersebut masih layak untuk digunakan karena lebih dari $5 \times 10^8 \text{ n/cm}^2.\text{s}$ (Arrozaqi, 2013).



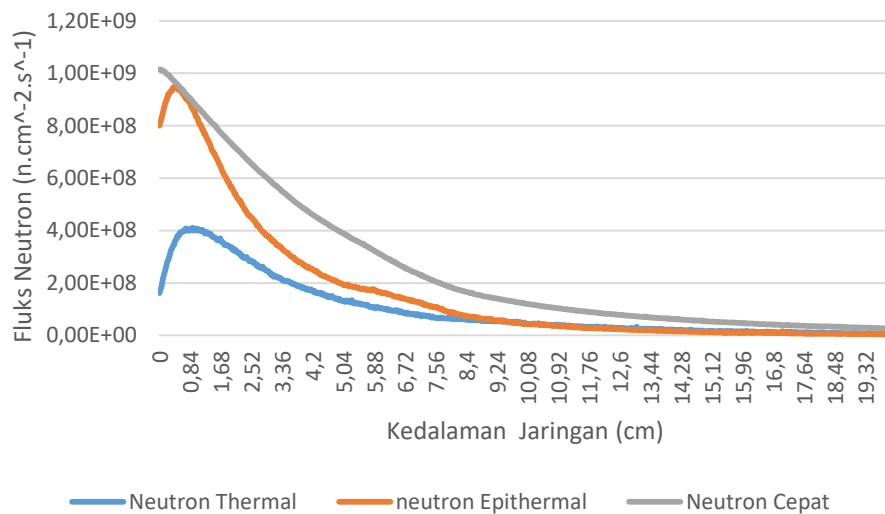
Gambar 4.3 Arah sumber neutron dalam simulasi

Gambar 4.3 menunjukkan arah iradiasi sumber neutron yang digunakan dalam penelitian ini. Jarak antara GTV, CTV, dan PTV adalah masing-masing 6 cm, 5,4 cm, dan 5 cm dari sumber neutron. Jarak antara sumber neutron dengan jaringan kanker cukup jauh sehingga diperlukan konsentrasi boron yang besar

untuk meningkatkan efektivitas pengobatan. Batasan maksimal konsentrasi boron dalam pengobatan BNCT adalah 150 $\mu\text{gram/gram}$ kanker dikarenakan dapat menjadi toksik jika lebih dari nilai tersebut (Rahmawati dan Darmawan, 2014). Pada penelitian ini konsentrasi boron yang digunakan berturut-turut sebesar 100 $\mu\text{gr/gr}$ kanker, 110 $\mu\text{gr/gr}$ kanker, 120 $\mu\text{gr/gr}$ kanker, 130 $\mu\text{gr/gr}$ kanker, 140 $\mu\text{gr/gr}$ kanker, dan 150 $\mu\text{gr/gr}$ kanker. Persentase konsentrasi boron dalam jaringan GTV, CTV, dan PTV diasumsikan sebesar 100%, 50%, dan 10%. Jaringan GTV sebagai pusat tumor dari kanker mendapatkan konsentrasi boron yang lebih banyak.

C. Fluks Neutron

Hasil keluaran dari PHITS berupa fluks neutron dan laju dosis hamburan neutron. Fluks neutron dinyatakan sebagai jumlah neutron yang melalui luasan sentimeter persegi setiap detik. Rentang energi neutron diklasifikasikan menjadi tiga yaitu neutron termal ($0 - 0,53\text{eV}$), epitermal ($0,53\text{eV} - 10\text{keV}$), dan cepat ($>10\text{keV}$) (IAEA, 2001).



Gambar 4.4. Distribusi fluks neutron terhadap kedalaman *phantom* pada konsentrasi boron 150 $\mu\text{gr}/\text{gr}$ kanker

Gambar 4.4 memperlihatkan hasil distribusi fluks neutron termal, epitermal, dan cepat yang melewati kedalaman *phantom* pada konsentrasi boron 150 $\mu\text{gr}/\text{gr}$ kanker sedangkan pada konsentrasi boron yang lain nilai fluks neutron yang diperoleh tidak jauh berbeda (lampiran 4). Gambar 4.4 menunjukkan bahwa nilai fluks neutron cepat lebih dulu tinggi dibanding yang lain, namun semakin dalam mengalami moderasi ataupun penurunan. Moderasi neutron adalah suatu fenomena dimana terjadinya suatu perlambatan ataupun penurunan energi dari neutron tersebut. Penurunan ini disebabkan sebagai akibat dari interaksi neutron dengan material dalam jaringan khususnya pada hidrogen dan nitrogen. Moderasi neutron cepat menyebabkan meningkatnya fluks neutron epitermal hingga mencapai puncak pada kedalaman 0,40 cm dengan nilai fluks $9,48 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ kemudian mengalami moderasi dan berubah menjadi neutron termal. Sedangkan nilai fluks neutron termal mencapai puncak pada kedalaman 0,9 cm dengan nilai fluks $4,10 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

Tabel 12. Nilai fluks neutron termal pada jaringan kanker

Konsentrasi boron ($\mu\text{g/g}$)	Fluks neutron termal
100	$1,12 \times 10^8$
110	$1,11 \times 10^8$
120	$1,10 \times 10^8$
130	$1,09 \times 10^8$
140	$1,08 \times 10^8$
150	$1,07 \times 10^8$

Tabel 12 menunjukkan nilai fluks termal pada jaringan kanker tiap konsentrasi boron. Berdasarkan tabel tersebut, nilai fluks termal mengalami penurunan seiring dengan kenaikan konsentrasi boron. Hal ini disebabkan material boron merupakan salah satu moderator neutron. Semakin meningkatnya konsentrasi boron akan meningkatkan penyerapan neutron sehingga nilai fluks neutron yang dihitung oleh PHITS semakin berkurang.

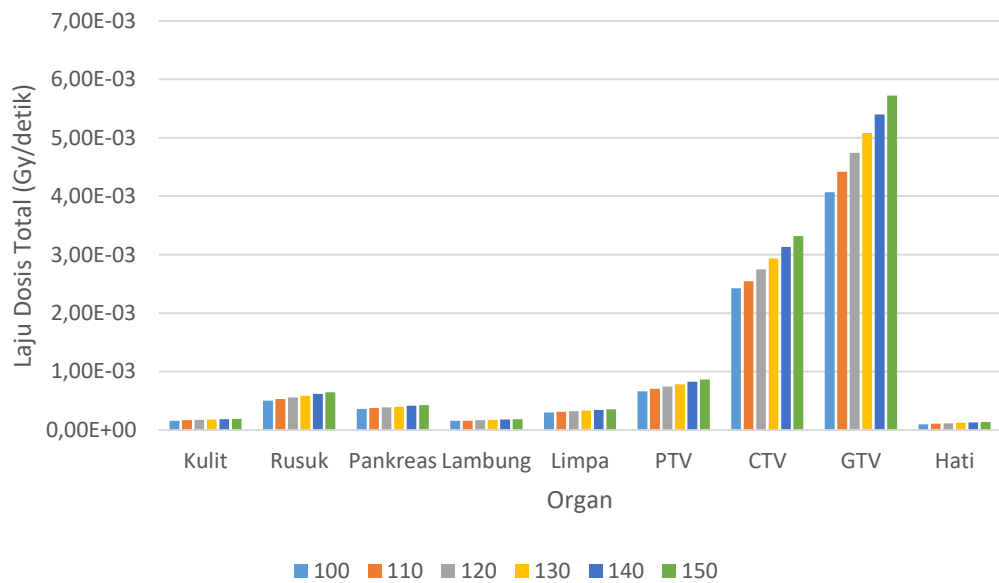
D. Laju Dosis

BNCT memiliki empat komponen dosis utama yang terdiri dari: dosis neutron, dosis proton, dosis gama, dan dosis boron. Hasil nilai fluks yang diperoleh dengan program PHITS digunakan untuk menghitung nilai laju dosis. Perhitungan laju dosis juga memperhitungkan faktor bobot biologis ataupun sumber radiasi seperti pada tabel 6. Perhitungan laju dosis yang lengkap diuraikan pada lampiran 3. Hasil perhitungan laju dosis total pada tiap organ atau jaringan terhadap konsentrasi boron diperlihatkan pada tabel berikut:

Tabel 13. Laju dosis total tiap organ terhadap konsentrasi boron

Organ	Laju Dosis Total (Gy/detik)					
	100µg/g	110µg/g	120 µg/g	130 µg/g	140 µg/g	150 µg/g
Kulit	1,60X10 ⁴	1,67X10 ⁴	1,73X10 ⁴	1,80X10 ⁴	1,86X10 ⁴	1,93X10 ⁴
Rusuk	5,02X10 ⁴	5,28X10 ⁴	5,58X10 ⁴	5,87X10 ⁴	6,17X10 ⁴	6,44X10 ⁴
Pankreas	3,60X10 ⁴	3,74X10 ⁴	3,85X10 ⁴	4,00X10 ⁴	4,14X10 ⁴	4,28X10 ⁴
Lambung	1,55X10 ⁴	1,60X10 ⁴	1,66X10 ⁴	1,72X10 ⁴	1,78X10 ⁴	1,85X10 ⁴
Limpa	3,00X10 ⁴	3,12X10 ⁴	3,21X10 ⁴	3,32X10 ⁴	3,42X10 ⁴	3,52X10 ⁴
PTV	6,60X10 ⁴	7,03X10 ⁴	7,42X10 ⁴	7,81X10 ⁴	8,23X10 ⁴	8,65X10 ⁴
CTV	2,42X10 ⁴	2,55X10 ⁴	2,75X10 ⁴	2,94X10 ⁴	3,13X10 ⁴	3,32X10 ⁴
GTV	4,07X10 ⁴	4,42X10 ⁴	4,74X10 ⁴	5,08X10 ⁴	5,40X10 ⁴	5,72X10 ⁴
Hati	9,81X10 ⁴	1,06X10 ⁴	1,14X10 ⁴	1,22X10 ⁴	1,30X10 ⁴	1,37X10 ⁴

Tabel 13 menunjukkan laju dosis total pada tiap organ terhadap variasi konsentrasi boron. Variasi konsentrasi boron mempengaruhi hasil laju dosis total pada tiap jaringan. Baik jaringan sehat maupun jaringan kanker mengalami kenaikan laju dosis total seiring dengan kenaikan konsentrasi boron. *Gross Tumour Volume* (GTV) yang menerima konsentrasi boron yang besar memiliki laju dosis total paling besar dibandingkan dengan jaringan lain. Laju dosis GTV yang besar terjadi pada konsentrasi boron 150 µg/g yaitu sebesar $5,72 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}$ dan laju dosis terkecil pada konsentrasi boron 100 µg/g sebesar $4,05 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}$. Nilai dari laju dosis total digunakan untuk menghitung waktu iradiasi dan dosis serap. Gambar 4.5 menunjukkan grafik peningkatan laju dosis per organ terhadap kenaikan konsentrasi boron.

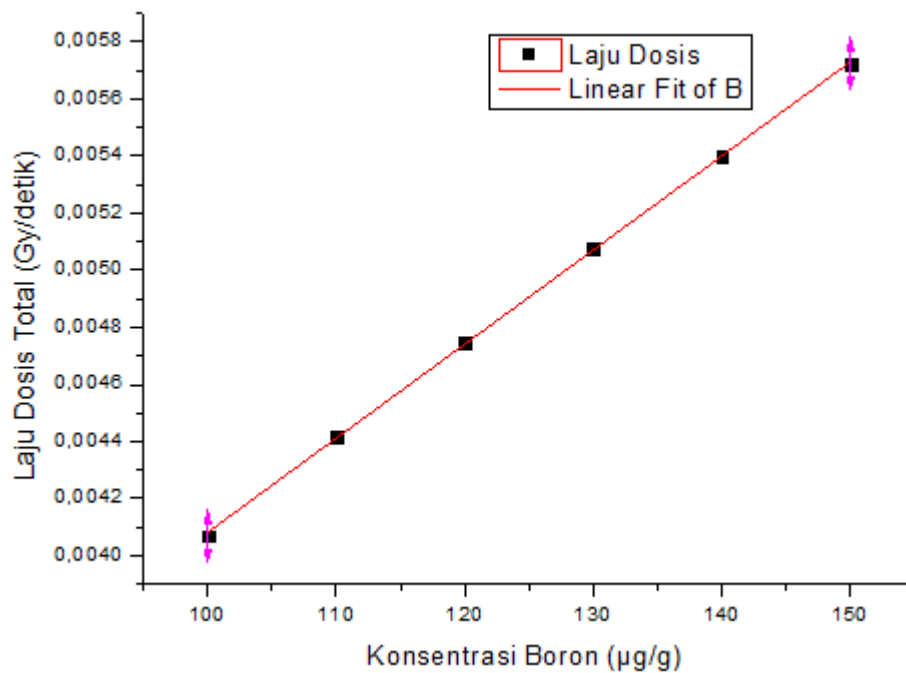


Gambar 4.5 Distribusi laju dosis terhadap konsentrasi boron

Hubungan antara konsentrasi boron terhadap hasil laju dosis digambarkan seperti pada gambar 4.6. Nilai laju dosis yang digunakan merupakan laju dosis total pada kanker seperti pada tabel 14.

Tabel 14. Nilai laju dosis total terhadap konsentrasi boron

Konsentrasi boron ($\mu\text{g/g}$)	Laju dosis total (Gy/detik)
100 $\mu\text{g/g}$	0,00407
110 $\mu\text{g/g}$	0,00442
120 $\mu\text{g/g}$	0,00474
130 $\mu\text{g/g}$	0,00508
140 $\mu\text{g/g}$	0,00540
150 $\mu\text{g/g}$	0,00572



Gambar 4.6. Hubungan konsentrasi boron terhadap laju dosis

Dari hasil gambar 4.6 dapat disimpulkan bahwa semakin besar konsentrasi boron maka nilai laju dosis juga semakin besar begitupun dengan semakin sedikit konsentrasi boron maka laju dosis semakin kecil. Hubungan ini berlangsung secara linear. Sehingga dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$y = a + b * x \quad (18)$$

Dengan y sebagai laju dosis total (Gy/detik), x sebagai konsentrasi boron (µg/g) dan nilai $a = 7,84018 \times 10^{-4}$, $b = 3,29754 \times 10^{-5}$.

Tabel 15. Nilai Laju dosis partikel terhadap konsentrasi boron

Konsentrasi boron ($\mu\text{g/g}$)	Laju dosis (Gy/detik)			
	Boron	Proton	Neutron	Gama
Kulit				
100	$6,95 \times 10^5$	$4,02 \times 10^5$	$5,00 \times 10^5$	$4,90 \times 10^7$
110	$7,62 \times 10^5$	$4,01 \times 10^5$	$4,98 \times 10^5$	$4,88 \times 10^7$
120	$8,31 \times 10^5$	$4,01 \times 10^5$	$4,95 \times 10^5$	$4,88 \times 10^7$
130	$9,00 \times 10^5$	$4,01 \times 10^5$	$4,93 \times 10^5$	$4,88 \times 10^7$
140	$9,69 \times 10^5$	$4,01 \times 10^5$	$4,90 \times 10^5$	$4,88 \times 10^7$
150	$1,04 \times 10^4$	$4,00 \times 10^5$	$4,88 \times 10^5$	$4,88 \times 10^7$
Rusuk				
100	$2,99 \times 10^4$	$1,92 \times 10^4$	$7,11 \times 10^6$	$3,68 \times 10^6$
110	$3,26 \times 10^4$	$1,91 \times 10^4$	$7,10 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$
120	$3,56 \times 10^4$	$1,91 \times 10^4$	$7,08 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$
130	$3,85 \times 10^4$	$1,91 \times 10^4$	$7,05 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$
140	$4,15 \times 10^4$	$1,91 \times 10^4$	$7,02 \times 10^6$	$3,65 \times 10^6$
150	$4,43 \times 10^4$	$1,90 \times 10^4$	$7,00 \times 10^6$	$3,63 \times 10^6$
Pankreas				
100	$1,55 \times 10^4$	$8,94 \times 10^5$	$8,52 \times 10^5$	$3,07 \times 10^5$
110	$1,70 \times 10^4$	$8,92 \times 10^5$	$8,49 \times 10^5$	$3,07 \times 10^5$
120	$1,82 \times 10^4$	$8,79 \times 10^5$	$8,47 \times 10^5$	$3,02 \times 10^5$
130	$1,97 \times 10^4$	$8,79 \times 10^5$	$8,47 \times 10^5$	$3,02 \times 10^5$
140	$2,12 \times 10^4$	$8,76 \times 10^5$	$8,44 \times 10^5$	$3,01 \times 10^5$
150	$2,26 \times 10^4$	$8,73 \times 10^5$	$8,42 \times 10^5$	$3,00 \times 10^5$
Lambung				
100	$7,45 \times 10^5$	$4,31 \times 10^5$	$2,60 \times 10^5$	$1,19 \times 10^5$
110	$8,01 \times 10^5$	$4,22 \times 10^5$	$2,60 \times 10^5$	$1,16 \times 10^5$
120	$8,67 \times 10^5$	$4,18 \times 10^5$	$2,58 \times 10^5$	$1,15 \times 10^5$
130	$9,34 \times 10^5$	$4,16 \times 10^5$	$2,57 \times 10^5$	$1,15 \times 10^5$
140	$9,98 \times 10^5$	$4,12 \times 10^5$	$2,55 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$
150	$1,07 \times 10^4$	$4,13 \times 10^5$	$2,55 \times 10^5$	$1,14 \times 10^5$
Limpa				
100	$1,28 \times 10^4$	$7,41 \times 10^5$	$7,34 \times 10^5$	$2,48 \times 10^5$
110	$1,40 \times 10^4$	$7,37 \times 10^5$	$7,32 \times 10^5$	$2,46 \times 10^5$
120	$1,51 \times 10^4$	$7,30 \times 10^5$	$7,28 \times 10^5$	$2,44 \times 10^5$
130	$1,63 \times 10^4$	$7,25 \times 10^5$	$7,24 \times 10^5$	$2,42 \times 10^5$
140	$1,74 \times 10^4$	$7,19 \times 10^5$	$7,21 \times 10^5$	$2,40 \times 10^5$
150	$1,85 \times 10^4$	$7,14 \times 10^5$	$7,17 \times 10^5$	$2,39 \times 10^5$
Planning Tumour Volume (PTV)				
100	$4,52 \times 10^4$	$8,94 \times 10^5$	$8,76 \times 10^5$	$3,07 \times 10^5$
110	$4,96 \times 10^4$	$8,92 \times 10^5$	$8,73 \times 10^5$	$3,07 \times 10^5$
120	$5,37 \times 10^4$	$8,85 \times 10^5$	$8,69 \times 10^5$	$3,04 \times 10^5$
130	$5,77 \times 10^4$	$8,79 \times 10^5$	$8,64 \times 10^5$	$3,02 \times 10^5$

Konsentrasi boron ($\mu\text{g/g}$)	Laju dosis (Gy/detik)			
	Boron	Proton	Neutron	Gama
Planning Tumour Volume (PTV)				
140	$6,20 \times 10^4$	$8,76 \times 10^5$	$8,60 \times 10^5$	$3,01 \times 10^5$
150	$6,62 \times 10^4$	$8,73 \times 10^5$	$8,55 \times 10^5$	$3,00 \times 10^5$
Clinical Tumour Volume (CTV)				
100	$2,14 \times 10^3$	$1,53 \times 10^4$	$1,06 \times 10^4$	$2,76 \times 10^5$
110	$2,27 \times 10^3$	$1,48 \times 10^4$	$1,05 \times 10^4$	$2,66 \times 10^5$
120	$2,47 \times 10^3$	$1,47 \times 10^4$	$1,05 \times 10^4$	$2,65 \times 10^5$
130	$2,66 \times 10^3$	$1,47 \times 10^4$	$1,04 \times 10^4$	$2,64 \times 10^5$
140	$2,86 \times 10^3$	$1,46 \times 10^4$	$1,03 \times 10^4$	$2,63 \times 10^5$
150	$3,04 \times 10^3$	$1,45 \times 10^4$	$1,02 \times 10^4$	$2,62 \times 10^5$
Gross Tumour Volume (GTV)				
100	$3,74 \times 10^3$	$1,34 \times 10^4$	$1,70 \times 10^4$	$2,41 \times 10^5$
110	$4,10 \times 10^3$	$1,33 \times 10^4$	$1,68 \times 10^4$	$2,40 \times 10^5$
120	$4,42 \times 10^3$	$1,32 \times 10^4$	$1,66 \times 10^4$	$2,38 \times 10^5$
130	$4,76 \times 10^3$	$1,31 \times 10^4$	$1,64 \times 10^4$	$2,36 \times 10^5$
140	$5,08 \times 10^3$	$1,30 \times 10^4$	$1,62 \times 10^4$	$2,34 \times 10^5$
150	$5,41 \times 10^3$	$1,29 \times 10^4$	$1,61 \times 10^4$	$2,32 \times 10^5$
Hati				
100	$8,97 \times 10^5$	$5,19 \times 10^6$	$2,71 \times 10^6$	$4,89 \times 10^7$
110	$9,81 \times 10^5$	$5,16 \times 10^6$	$2,65 \times 10^6$	$4,86 \times 10^7$
120	$1,06 \times 10^4$	$5,10 \times 10^6$	$2,63 \times 10^6$	$4,81 \times 10^7$
130	$1,14 \times 10^4$	$5,08 \times 10^6$	$2,59 \times 10^6$	$4,78 \times 10^7$
140	$1,18 \times 10^4$	$4,88 \times 10^6$	$2,59 \times 10^6$	$4,60 \times 10^7$
150	$1,26 \times 10^4$	$4,88 \times 10^6$	$2,57 \times 10^6$	$4,59 \times 10^7$

Tabel 15 menunjukkan nilai laju dosis proton, neutron, dan gama pada setiap organ terhadap variasi konsentrasi boron. Hasil pada tabel 15 menunjukkan seiring kenaikan konsentrasi boron maka nilai laju dosis boron cenderung meningkat. Hal ini dikarenakan tampang lintang boron untuk menangkap neutron termal lebih besar dibandingkan dengan yang lain yaitu sebesar 3863,7 barn. Nilai laju dosis proton, neutron, dan gama cenderung menurun., adanya penurunan nilai fluks neutron setiap kenaikan konsentrasi boron sehingga neutron banyak yang terserap oleh boron.

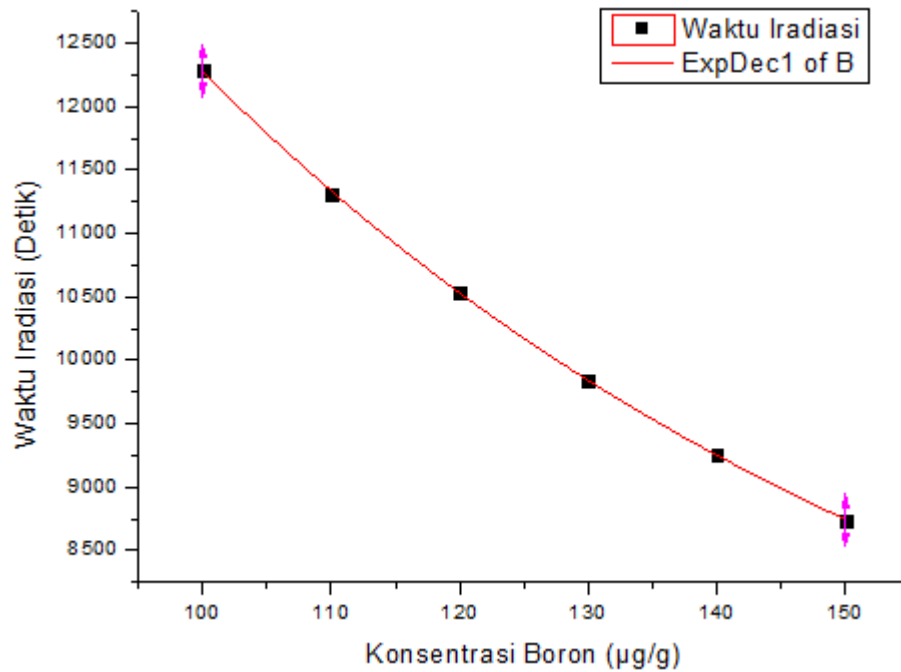
E. Waktu Iradiasi

Setelah nilai laju dosis total didapatkan maka lamanya waktu iradiasi dapat diperoleh. Perhitungan waktu iradiasi sesuai dengan persamaan 16 yaitu dosis standar atau dosis minimal perusak kanker dibagi dengan laju dosis total pada kanker. Nilai dosis standar yang digunakan pada penelitian ini adalah 50 Gy. Lamanya waktu iradiasi yang didapatkan pada penelitian ini seperti pada tabel 16.

Tabel 16. Waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron

Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$)	Laju dosis total (Gy/detik)	Waktu iradiasi (detik)	Waktu iradiasi
100	$4,07 \times 10^{-3}$	12285,87	3 jam 25 menit 46 detik
110	$4,42 \times 10^{-3}$	11312,35	3 jam 9 menit 32 detik
120	$4,74 \times 10^{-3}$	10539,87	2 jam 56 menit 40 detik
130	$5,08 \times 10^{-3}$	9843,92	2 jam 44 menit 4 detik
140	$5,40 \times 10^{-3}$	9259,50	2 jam 34 menit 19 detik
150	$5,72 \times 10^{-3}$	8736,72	2 jam 26 menit 37 detik

Dari hasil pada tabel 16 diketahui bahwa konsentrasi boron mempengaruhi laju dosis total juga waktu iradiasi yang dihasilkan. Semakin besar konsentrasi boron maka laju dosis total akan semakin tinggi sehingga lamanya waktu iradiasi dapat menjadi semakin pendek. Pada pengobatan BNCT diharapkan waktu iradiasi tidak begitu lama sehingga memberikan kenyamanan terhadap pasien. Hubungan antara konsentrasi boron dengan waktu iradiasi digambarkan dalam bentuk gambar 4.7.



Gambar 4.7. Waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron

Gambar 4.7 menunjukkan hubungan antara waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron. Waktu iradiasi terhadap boron cenderung membentuk grafik eksponensial. Hubungan antara waktu iradiasi terhadap konsentrasi boron dinyatakan juga dalam persamaan 19.

$$y = A_1 * e^{\left(-\frac{x}{t_1}\right)} + y_0 \quad (19)$$

Dimana, y sebagai waktu iradiasi (detik), x adalah konsentrasi boron (µg/g) dengan nilai $A_1 = 30882,45939$, $Y_0 = 5734,37203$, dan $t_1 = 64,43241$.

F. Dosis Serap

Setelah nilai laju dosis total tiap konsentrasi boron dan waktu iradiasi diketahui maka nilai dosis serap pada jaringan dapat ditetapkan. Nilai dosis serap tiap jaringan per konsentrasi boron ditunjukkan pada tabel 17.

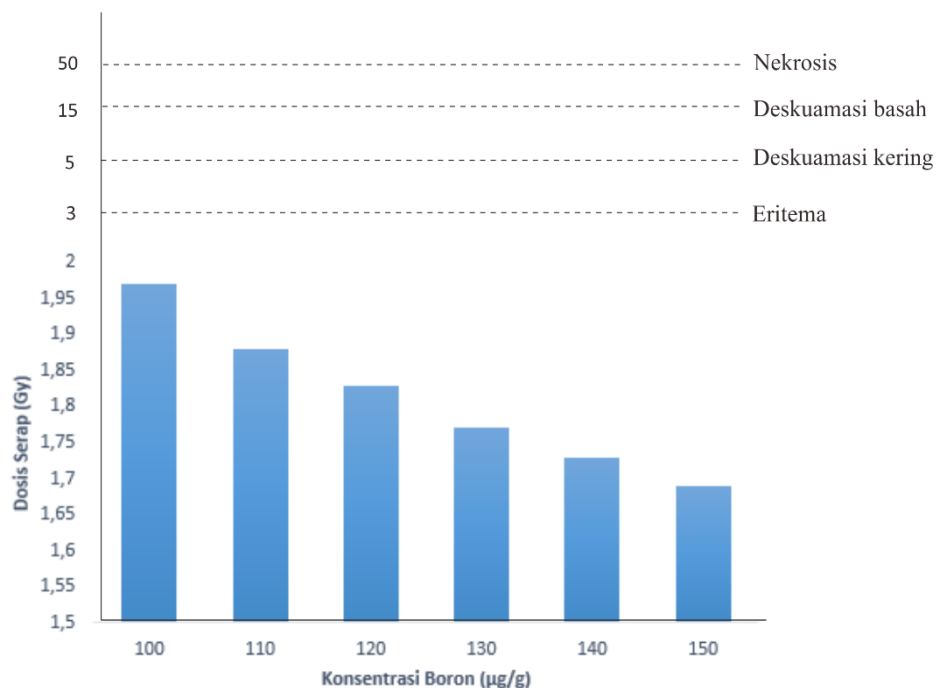
Tabel 17. Nilai dosis serap tiap organ per konsentrasi boron

Organ	Dosis serap total (Gy)					
	100 µg/g	110 µg/g	120 µg/g	130 µg/g	140 µg/g	150 µg/g
Kulit	1,97	1,88	1,83	1,77	1,73	1,69
Rusuk	6,17	5,97	5,88	5,78	5,71	5,62
Pankreas	4,42	4,24	4,06	3,94	3,83	3,74
Lambung	1,91	1,81	1,75	1,69	1,65	1,62
Limpa	3,69	3,53	3,39	3,27	3,17	3,08
Hati	1,21	1,21	1,21	1,21	1,17	1,17
PTV	8,10	7,95	7,82	7,69	7,62	7,55
CTV	29,78	28,83	27,89	27,75	27,60	27,49
GTV	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00

Pada jaringan sehat, dosis yang diserap perlu diperhatikan agar tidak menimbulkan efek samping yang merusak. Nilai batas toleransi digunakan sebagai acuan untuk melihat efek radiasi yang diterima oleh jaringan. Jaringan kulit merupakan jaringan yang paling sensitif menerima radiasi. Jaringan kulit sebagai jaringan terluar pada tubuh dapat digunakan sebagai tanda awal efek biologis yang diterima oleh paparan radiasi. Berdasarkan Perka BAPETEN nomor 6 tahun 2010 tentang pemantauan kesehatan untuk pekerja radiasi bahwa jaringan kulit yang terkena paparan radiasi dapat menimbulkan eritema, deskuamasi kering, deskuamasi basah, dan nekrosis (BAPETEN, 2010).

Paparan radiasi sekitar 3 Gy dapat menimbulkan efek kemerahan (eritema) sementara yang timbul dalam waktu beberapa jam dan kemudian menghilang. Dosis sekitar 5 Gy menyebabkan terjadinya kerontokan rambut (epilasi) dan

pengelupasan kulit (deskuamasi kering) dalam waktu 3 – 6 minggu setelah paparan radiasi. Pada dosis yang lebih tinggi, sekitar 15 Gy, akan mengakibatkan terjadinya pengelupasan kulit disertai dengan pelepasan dan bernanah (blister) serta peradangan akibat infeksi pada lapisan dalam kulit (dermis) sekitar 4 – 6 minggu kemudian. Kematian jaringan (nekrosis) timbul setelah paparan radiasi dengan dosis lebih besar dari 50 Gy, sebagai akibat dari kerusakan yang parah pada kulit dan pembuluh darah (BAPETEN, 2010).



Gambar 4.8. Dosis serap jaringan kulit per konsentrasi boron

Gambar 4.8 menunjukkan grafik dosis serap pada jaringan kulit per konsentrasi boron selama pengobatan. Dosis serap yang diperoleh masih dibawah batas ambang batas yang ditetapkan oleh BAPETEN. Dosis serap jaringan kulit yang rendah pada konsentrasi boron 150 µg/g sebesar 1,69 Gy. Sehingga konsentrasi boron yang efektif untuk pengobatan kanker pankreas adalah 150 µg/g.

Konsentrasi boron 150 $\mu\text{g/g}$ sebagai batas maksimal yang disarankan agar tidak terjadi timbulnya toksik pada unsur boron. Dari hasil dosis serap yang diperoleh dinyatakan bahwa hasil tersebut masih dapat digunakan sesuai dengan dosis dosis ambang yang direkomendasikan BAPETEN. Walaupun waktu iradiasi masih cukup lama untuk pengobatan BNCT.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian “Analisis Dosis Pengobatan Kanker Pankreas dengan Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) menggunakan Program *Particle and Heavy Ion Transport Code* (PHITS) maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Konsentrasi boron yang efektif dalam rentang 100 µg/g, 110 µg/g, 120 µg/g, 130 µg/g, 140 µg/g, dan 150 µg/g adalah konsentrasi boron 150 µg/g.
2. Nilai laju dosis konsentrasi boron yang efektif 150 µg/g adalah $5,72 \times 10^{-3}$ Gy/detik.
3. Waktu iradiasi terpendek adalah 8736,72 detik (2 jam 26 menit 37 detik) pada konsentrasi boron 150 µg/g.

B. Saran

1. Diperlukan sumber neutron yang menghasilkan fluks neutron yang besar agar lebih optimal dalam pengobatan khususnya pada kanker yang terletak lebih dalam.
2. Melakukan analisis pada arah radiasi lain pada pengobatan kanker pankreas.
3. Melakukan studi dampak radiasi pada jaringan-jaringan sehat lebih dalam.

DAFTAR PUSTAKA

- Ariani, Sofi. 2015. *Stop Kanker!* Yogyakarta: Istana Media.
- Arrozaqi, M. I. M. (2013). *Perancangan Kolimator di Beam Port Tembus Reaktor Kartini untuk Boron Neutron Capture Therapy*. Universitas Gadjah Mada.
- Athiqoh, F., Budi, W. S., Anam, C., Fisika, J., & Diponegoro, U. (2014). Distribusi Fluks Neutron Sebagai Fungsi Burn-Up Bahan. *Youngster Physics Journal*, 3(2).
- Bajoria, A. A., Kamath, G., ML, A., Babshetand, M., & Piyush Sukhija. (2015). Boron Neutron Capture Therapy – Redefining Radiotherapy. *International Journal of Current Research*, 6(9), 8834–8838.
- BAPETEN. (2010). Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomo 6 Tahun 2010 tentang Pemantauan Kesehatan untuk Pekerja Radiasi.
- Brunicardi, F. C., Andersen, D. K., Billiar, T. R., Dunn, D. L., Hunter, J. G., Matthews, J. B., & Pollock, R. E. (2010). *Schwartz's Principles of Surgery Tenth Edition*. McGraw-Hill Education. <https://doi.org/10.1097/00005053-189608000-00022>
- Canadian Nuclear Safety Commission. (2012). *Introduction to Dosimetry*. Diambil dari http://nuclearsafety.gc.ca/pubs_catalogue/uploads/INFO-0827-Introduction-to-Dosimetry-e.pdf
- COMPTON, C. C., BYRD, D. R., & AGUILAR, J. G. (2012). *Ajcc Cancer Staging Atlas. Library* (2 ed.). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-2080-4>
- Cristy, M., & Eckerman, K. F. (1987). *Specific Adsorbed Fractions of Energy at Various Ages From Internal Photon Sources*. Oak Ridge National Laboratory. <https://doi.org/10.1.1.453.354>
- Darsono, Safirudin, & Toifur, M. (2013). Simulasi desain perisai radiasi mbe-lateks menggunakan mcnp5. *Iptek Nuklir Ganendra*, 5, 87–96.
- Edgecock, T. R., Bennett, J. R. J., Rutherford, S., Green, S., Phoenix, B., & Scott, M. (2014). Study of the Production of Neutrons for Boron Neutron Capture Therapy Using a Proton Accelerator *. *Proceedings of the 5th International Particle Accelerator Conference, IPAC 2014*, 2195–2197.
- Fitriatuzzakiyyah, N., Sinuraya, R. K., Puspitasari, I. M., Farmakologi, D., & Farmasi, F. (2017). Terapi Kanker dengan Radiasi : Konsep Dasar Radioterapi dan Perkembangannya di Indonesia. *Jurnal Farmasi Klinik Indonesia*, 6(4), 311–320. <https://doi.org/10.15416/ijcp.2017.6.4.311>
- Fitzmaurice, C., Allen, C., Barber, R. M., Barregard, L., Bhutta, Z. A., Brenner, H., ... Naghavi, M. (2017). Global, regional, and national cancer incidence, mortality, years of life lost, years lived with disability, and disability-

- adjusted life-years for 32 cancer groups, 1990 to 2015: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study Global Burden . *JAMA Oncology*, 3(4), 524–548. <https://doi.org/10.1001/jamaoncol.2016.5688>
- Furuta, T., Sato, T., Han, M. C., Yeom, Y. S., Kim, C. H., Brown, J. L., & Bolch, W. E. (2017). Implementation of tetrahedral-mesh geometry in Monte Carlo radiation transport code PHITS. *Physics in Medicine and Biology*, 62(12), 4798–4810. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/aa6b45>
- Güngör, C., Hofmann, B. T., Wolters-Eisfeld, G., & Bockhorn, M. (2014). Pancreatic cancer. *British Journal of Pharmacology*, 171(4), 849–858. <https://doi.org/10.1111/bph.12401>
- Hadizadeh, M., Padashi, M., & Mohammad, A. H. (2014). Clinical , Laboratory Biomarkers and Imaging Findings of Pancreatic Adenocarcinoma in Iran. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 15, 4349–4352.
- Hakim, R. R., & Ramli, I. (2012). Prinsip Dasar Terapi Kombinasi Radiasi dan Kemoterapi. *Radioterapi & Onkologi Indonesia*, 3(2), 65–72.
- Hartge, P., Wang, S. S., Bracci, P. M., Devesa, S. S., Holly, E. A., & Schottenfeld D, F. J. F. J. (2006). *Cancer Epidemiology and Prevention*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195149616.001.0001>
- health grove. (2016). Pancreatic Cancer in Indonesia - Stats, Demographics Affected. Diambil 27 Januari 2018, dari <http://global-disease-burden.healthgrove.com/1/36170/Pancreatic-Cancer-in-Indonesia>
- Hejmadi, M. (2009). *Introduction to Cancer Biology. Molecular Imaging Probes for Cancer Research*. https://doi.org/10.1142/9789814293686_0001
- Husain, K. (2014). Pancreatic Cancer Treatment. *Journal of Drug Metabolism & Toxicology*, 05(01), 1–5. <https://doi.org/10.4172/2157-7609.1000162>
- IAEA. (2001). Current status of neutron capture therapy. *IAEA, 2001* (8), (May), 75–77.
- Irhas. (2014). *Dosimetri Boron Neutron Capture Therapy pada Kanker Hati (Hepatocellular Carsinoma) menggunakan MCNP-Code dengan Sumber Neutron dari Kolom Termal Reaktor Kartini*.
- Kamisawa, T., Wood, L. D., Itoi, T., & Takaori, K. (2016). Pancreatic cancer. *Lancet (London, England)*, 388(10039), 73–85. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)00141-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)00141-0)
- Kanygin, V. V., Kichigin, A. I., Krivoschapkin, A. L., & Taskaev, S. Y. (2017). Perspectives of boron-neutron capture therapy of malignant brain tumors. *Amerivan Institute of Physic*, 020030. <https://doi.org/10.1063/1.5001609>
- Kementrian Kesehatan RI. (2015). *Stop Kanker. infodatin Kanker*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Kortesniemi, M. (2002). *Solutions for clinical implementation of boron neutron capture therapy in Finland*.
- Krstic, D., Nikezic, D. (2006). INPUT FILES WITH ORNL-MATHEMATICAL PHANTOMS OF THE HUMAN BODY FOR MCNP-4B Nature of problem: Diambil 9 Agustus 2018, dari <http://www.pmf.kg.ac.rs/radijacionafizika/InputFiles.html>
- Laurenția, G. N., & Rodica, A. M. (2016). Boron Neutron Capture Therapy: Delivery Agents Used in Boron Administration Therapeutical Practice. *Therapeutics Pharmacology and Clinical Toxicology*, 20(1), 25–32.
- Lu, J. J., & Brady, L. W. (2011). Decision Making in Radiation Oncology. *Radiation Oncology*, 1(1). <https://doi.org/10.1186/1748-717X-1-36>
- Lucas, A. L., Malvezzi, M., Carioli, G., Negri, E., La Vecchia, C., Boffetta, P., & Bosetti, C. (2016). Global Trends in Pancreatic Cancer Mortality From 1980 Through 2013 and Predictions for 2017. *Clinical Gastroenterology and Hepatology*, 14(10), 1452–1462.e4. <https://doi.org/10.1016/j.cgh.2016.05.034>
- McConn Jr RJ. (2011). Compendium of material composition data for radiation transport modeling. *PNNL-15870 Rev, 1*, 1–357. <https://doi.org/10.2172/1023125>
- MIYATAKE, S.-I., KAWABATA, S., HIRAMATSU, R., KUROIWA, T., SUZUKI, M., KONDO, N., & ONO, K. (2016). Boron Neutron Capture Therapy for Malignant Brain Tumors. *Neurologia medico-chirurgica*, 56(7), 361–371. <https://doi.org/10.2176/nmc.ra.2015-0297>
- Moss, R. L. (2014). Critical review, with an optimistic outlook, on Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). *Applied Radiation and Isotopes*, 88, 2–11. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.11.109>
- Nedunchezian, K. (2016). Boron Neutron Capture Therapy - A Literature Review. *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 10(12), 1–4. <https://doi.org/10.7860/JCDR/2016/19890.9024>
- Niita, K., Iwase, H., Sato, T., & Iwamoto, Y. (2011). Recent Developments of the PHITS code. *Progress in Nuclear Science and Technology*, 1, 1–6.
- Niita, K., Sato, T., Iwase, H., Nose, H., Nakashima, H., & Sihver, L. (2006). PHITS-a particle and heavy ion transport code system. *Radiation Measurements*, 41(9–10), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2006.07.013>
- Oktarina, A. B., Rasyad, S. B., Studi, P., Dokter, P., Kedokteran, F., Sriwijaya, U., ... Km, R. (2015). Karakteristik Penderita Kanker Pankreas di Instalasi Rawat Inap RSUP Dr . Mohammad Hoesin Palembang Tahun 2009 - 2013. *Mks*, 47(1), 22–30.

- Popescu valceanu, H.-C., Nan, R., Dragut, R., & Rusu, E. (2015). PANCREATIC CANCER: EPIDEMIOLOGY AND RISK FACTORS. *THE PUBLISHING HOUSE OF THE ROMANIAN ACADEMY*, 20(2), 197–209.
<https://doi.org/10.1016/j.bpg.2005.10.001>
- Rahmawati, N. A., & Darmawan, D. (2014). *Analisis Dosis Pada Penyembuhan Kanker Payudara Dengan Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) Menggunakan Mcnp the Dosage Analysis on Breast Cancer Healing With Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) By Using Mcnp X*.
- Rosidah, S., Sardjono, Y., & Sumardi, Y. (2017). Dose Analyze of Boron Neutron Capture Therapy (Bnct) At Skin Cancer Melanoma Using Mcnpx With Neutron Source From Thermal Column of Kartini. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*, 2(3), 111–123.
- Saab, T. B., & Rayes, B. El. (2018). *Current and Emerging Therapies in Pancreatic Cancer. Current and Emerging Therapies in Pancreatic Cancer* (Vol. 23). <https://doi.org/10.1158/1078-0432.ccr-16-2319>
- Saadeddin, A. (2012). Radiotherapy for NSCLC: Review of conventional and new treatment techniques. *Journal of Infection and Public Health*, 5(5 SUPPL.1), S45–S49. <https://doi.org/10.1016/j.jiph.2012.09.002>
- Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S., ... Niita, K. (2018). Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 3131, 1–7.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., ... Sihver, L. (2013). Particle and heavy ion transport code system, PHITS, version 2.52. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 50(9), 913–923.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2013.814553>
- Sauerwein, W. A. G. (2012). *Neutron Capture Therapy* (Vol. 5).
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-31334-9>
- Sauerwein, W. A. G., & Moss, R. L. (2009). *Requirements for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) at a Nuclear Research Reactor*.
<https://doi.org/10.2790/11743>
- Seki, R., Wakisaka, Y., Morimoto, N., Takashina, M., Koizumi, M., Toki, H., & Fukuda, M. (2017). Physics of epi-thermal boron neutron capture therapy (epi-thermal BNCT). *Radiological Physics and Technology*, 10(4), 1–22.
<https://doi.org/10.1007/s12194-017-0430-5>
- Siegel, R. L., Miller, K. D., & Jemal, A. (2017). Cancer statistics, 2017. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 67(1), 7–30.
<https://doi.org/10.3322/caac.21387>
- Stark, A., & Eibl, G. (2015). Pancreatic Ductal Adenocarcinoma. *Pancreapedia*, 10, 1–9. <https://doi.org/10.3998/panc.2015.14>

- Stewart, B. W., & Wild, C. P. (2014). World cancer report 2014. *World Health Organization*, 1–2. <https://doi.org/9283204298>
- Vinay, K. A. K. A. J. C. A. (2013). *Basic Pathology. Journal of Clinical Pathology* (Vol. 47). <https://doi.org/10.1136/jcp.47.1.95-d>
- Walling, A., & Freelove, R. (2017). Pancreatitis and Pancreatic Cancer. *Primary Care - Clinics in Office Practice*, 44(4), 609–620. <https://doi.org/10.1016/j.pop.2017.07.004>
- Warfi, R., Harto, A. W., & Sardjono, Y. (2016). Optimization of Neutron Collimator in The Thermal Column of Kartini Research Reactor for in vitro and in vivo Trials Facility of Boron Neutron Capture Therapy using MCNP-X Simulator. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*, 1(10), 63–72.
- Yulianti, S. (2010). *Faktor – Faktor yang Berhubungan dengan Kejadian Kanker Fakultas Ilmu Kesehatan Universitas Islam Negeri (UIN) ALAUDDIN*.

LAMPIRAN-LAMPIRAN

LAMPIRAN 1

Kode Input PHITS konsentrasi boron 150 µg/g kanker

[Title]

ANALISIS DOSIS PENGOBATAN BORON NEUTRON CAPTURE THERAPY (BNCT) PADA KANKER PANKREAS MENGGUNAKAN PARTICLE AND HEAVY ION TRANSPORT CODE SYSTEM (PHITS)

oleh Azzam Zukhrofani Iman

[Parameters]

```
icntl = 0 # (D=0) 3:ECH 5:NOR 6:SRC 7,8:GSH 11:DSH 12:DUMP
maxcas = 1000 # (D=10) number of particles per one batch
maxbch = 10 # (D=10) number of batches
maxbnk = 500
emin(2) = 1.000000000E-10 # (D=1.0) cut-off energy of neutron (MeV)
emin(12) = 1.000000000E-01 # (D=1.d9) cut-off energy of electron (MeV)
emin(14) = 1.000000000E-03 # (D=1.d9) cut-off energy of photon (MeV)
emin(18) = 1.000000000E-03 # (D=1.d9) cut-off energy of alpha (MeV)
emin(19) = 1.000000000E-03 # (D=1.d9) cut-off energy of nucleus (MeV)
dmax(2) = 20.0000000 # (D=emin(2)) data max. energy of neutron (MeV)
dmax(12) = 1000.00000 # (D=emin(12)) data max. energy of electron (MeV)
dmax(14) = 1000.00000 # (D=emin(14)) data max. energy of photon (MeV)
dmax(18) = 1000.00000 # (D=emin(18)) data max. energy of alpha (MeV)
dmax(19) = 1000.00000 # (D=emin(18)) data max. energy of nucleus (MeV)
file(6) = phits.out # (D=phits.out) general output file name
e-mode = 2
igamma = 2 # (D=0) 0:No, 1:Old, 2:EBITEM, 3:EBITEM+Isomer
ipnint = 1 # (D=0) 0: no, 1: consider photo-nuclear reaction
ielas = 1 # include neutron elastic scattering
icput = 1 # (D=0) CPU time count options
dnb = 0 # (D=-1) number of delayed neutron
negs = 1 # (D=0) Option for the usage of EGS5
tmax(20) = 1.0E09 # (D=1.0e9) cut-off time for all particle (1 second)
```

[Source]

```
totfact = 2.5**2*pi # (D=1.0) global factor
<source> = 2.0
s-type = 4 # mono-energetic axial source / cylinder with energy distribution
proj = neutron # kind of incident particle
r0 = 1.4 # radius [cm]
z0 = 0.
z1 = 0.
dir = 1. # z-direction of beam [cosine]
trcl = 50
e-type = 8
ne = 1502
infl = {Neutron.inp}{1-1502}
```

```

<source> = 1
s-type = 4      # mono-energetic axial source
proj = photon   # kind of incident particle
totfact = 2.5**2*pi      # (D=1.0) global factor
r0 = 1.4        # radius [cm]
z0 = 0.
z1 = 0.
dir = 1.        # z-direction of beam [cosine]
trcl = 50
e-type = 8
ne = 1502
infl = {Photon.inp}{1-1502}
[ M A T E R I A L]
m1 1001 -0.104470433 $Hydrogen (H)
    6012 -0.232186517 $Karbon (C)
    7014 -0.024879627 $Nitrogen (N)
    8016 -0.630228547 $Oksigen (O)
    11023 -0.001129983 $Natrium (Na)
    12024 -0.000129998 $Magnesium
    15031 -0.00132998 $Fosfor (P)
    16032 -0.00198997 $Sulfur (S)
    17035 -0.00133998 $Klor (Cl)
    19039 -0.00198997 $Kalium (K)
    20040 -0.000229997 $Kalsium (Ca)
    26056 -4.99993E-05 $Ferum (Fe)
    30065 -2.99996E-05 $Zinc/ seng (Zn)
    5010 -1.49998E-05 $Boron (B)
m2 1001 -0.098992576 $Hydrogen (H)
    6012 -0.268979827 $Karbon (C)
    7014 -0.044996625 $Nitrogen (N)
    8016 -0.568957328 $Oksigen (O)
    15031 -0.01799865 $Fosfor (P)
    5010 -7.49944E-05 $Boron (B)
m3 1001 -0.098985152 $Hydrogen (H)
    6012 -0.268959656 $Karbon (C)
    7014 -0.044993251 $Nitrogen (N)
    8016 -0.568914663 $Oksigen (O)
    15031 -0.0179973 $Fosfor (P)
    5010 -0.000149978 $Boron (B)
m4 1001 -0.104470433 $Hydrogen (H)
    6012 -0.232186517 $Karbon (C)
    7014 -0.024879627 $Nitrogen (N)
    8016 -0.630228547 $Oksigen (O)
    11023 -0.001129983 $Natrium (Na)
    12024 -0.000129998 $Magnesium

```

PTV

CTV

GTV

	15031	-0.00132998	\$Fosfor (P)	
	16032	-0.00198997	\$Sulfur (S)	
	17035	-0.00133998	\$Klor (Cl)	
	19039	-0.00198997	\$Kalium (K)	
	20040	-0.000229997	\$kalsium (Ca)	
	26056	-4.99993E-05	\$Ferum (Fe)	
	30065	-2.99996E-05	\$Zinc/ seng (Zn)	
	5010	-1.49998E-05	\$Boron (B)	material jaringan lunak
m5	1001	-0.10063549	\$Hidrogen (H)	
	6012	-0.107828383	\$karbon (C)	
	7014	-0.027679585	\$Nitrogen (N)	
	8016	-0.754761679	\$Oksigen (O)	
	11023	-0.000749989	\$Natrium (Na)	
	12024	-0.000189997	\$Magnesium	
	15031	-0.001799973	\$Fosfor (P)	
	16032	-0.002409964	\$Sulfur (S)	
	17035	-0.000789988	\$Klor (Cl)	
	19039	-0.003019955	\$Kalium (K)	
	20040	-2.99996E-05	\$kalsium (Ca)	
	26056	-3.99994E-05	\$Ferum (Fe)	
	30065	-4.99993E-05	\$Zinc/ seng (Zn)	
	5010	-1.49998E-05	\$Boron (B)	material tulang/otot
m6	6012	-0.000124	\$carbon	
	7014	-0.755267	\$nitrogen	
	8016	-0.231781	\$oxygen	
	18040	-0.012827	\$argon	material udara
m7	1001	-0.104470433	\$Hidrogen (H)	
	6012	-0.232186517	\$karbon (C)	
	7014	-0.024879627	\$Nitrogen (N)	
	8016	-0.630228547	\$Oksigen (O)	
	11023	-0.001129983	\$Natrium (Na)	
	12024	-0.000129998	\$Magnesium	
	15031	-0.00132998	\$Fosfor (P)	
	16032	-0.00198997	\$Sulfur (S)	
	17035	-0.00133998	\$Klor (Cl)	
	19039	-0.00198997	\$Kalium (K)	
	20040	-0.000229997	\$kalsium (Ca)	
	26056	-4.99993E-05	\$Ferum (Fe)	
	30065	-2.99996E-05	\$Zinc/ seng (Zn)	
	5010	-1.49998E-05	\$Boron (B)	badan
[Mat Name Color]				
mat name size color				
1 PTV 1 pastelgreen				
2 CTV 1 blue				
3 GTV 1 red				
4 jaringanlunak 1 pastelyellow				

5 tulang 1 darkred
6 udara 1 cyan
7 badan 1 violet

[S u r f a c e]

8 px 1000.0
9 py -1000.0
10 py 1000.0
11 sq 100 400 0 0 0 0 -40000 0 0 0 \$trunk-skin
12 pz 91.45
15 pz 200.0
16 sq 96.04 392.04 0 0 0 0 -37651.521 0 0 0 \$trunk
18 sq 96.04 60.84 0 0 0 0 -5843.0736 0 0 0 \$head1
19 pz 69.80
20 pz -79.8
21 cz 5.4
22 pz 78.40
322 pz 78.6
27 pz 46
28 pz 54
29 px -5.4
30 py 1.5 \$ end the section removed from the right lung
31 pz 43.5
32 pz 55
33 px 8.0
34 py 1.0 \$end the section removed from the left lung
35 sq 64 272.25 0 0 0 0 -17424 0 0 0
36 pz 27
37 pz 43
38 p 0.028571 0.022222 -0.023256 -1
39 sq 576 896 144 0 0 0 -9216 8 -4 35 \$ stomach-wall
40 sq 310.914543 625.988841 65.363490 0 0 0 -3566.739812 8 -4 35 \$ stomach-contents
48 sq 0.1764 1.3689 0 0 0 0 -0.24147396 0 2.575 0 \$esophagus: thoracic+abdominal portion
65 px 3.0
135 sq 68.0625 612.5625 45.5625 0 0 0 -1378.265625 6.0 6.0 32.50 \$left kidney
136 sq 68.0625 612.5625 45.5625 0 0 0 -1378.265625 -6.0 6.0 32.50 \$right kidney
137 px -3
138 sq 15.6816 2787.84 368.64 0 0 0 -4014.4896 -1.0 0 37 \$pancreas
139 px -1
140 pz 37
151 4 sq 240.25 710.7556 1849 0 0 0 -17768.89 0 0 0
152 4 sq 44.3556 172.6596 729.6596 0 0 0 -2363.709924 0 0 0
153 4 px 0
154 4 sq 1225 3624.08 1849 0 0 0 -90601 0 0 0

155 4 sq 792.9856 2621.44 1239.04 0 0 0 -50751.0784 0 0 0
 156 4 pz 0
 157 4 sq 240.25 280.2276 729 0 0 0 -7005.69 0 0 0
 158 4 sq 173.1856 203.9184 574.5609 0 0 0 -4504.557456 0 0 0
 159 4 sq 110.25 128.5956 729 0 0 0 -3214.89 0 0 0
 160 4 sq 71.5716 84.2724 574.5609 0 0 0 -1861.577316 0 0 0
 161 4 sq 1225 1428.84 729 0 0 0 -35721 0 0 0
 162 4 sq 991.6201 1167.5889 574.5609 0 0 0 -25792.038801 0 0 0
 175 sq 0.0144 0.7569 0 0 0 0 -0.01089936 0 2.575 0
 75 sq 94.09 289 0 0 0 0 -27192.01 0 0 0 \$scapulae
 74 sq 95.8441 289 0 0 0 0 -27698.94 0 0 0
 76 p 0.25 -1 0 0 \$left
 77 p 0.80 -1 0 0
 78 pz 50.9
 79 pz 67.3
 80 p 0.25 1 0 0 \$right
 81 p 0.80 1 0 0
 83 sq 144 144 0 0 0 0 -20736 0 -3 0
 84 pz 22
 85 pz 14
 86 py 5
 87 py -3
 89 sq 86.49 272.25 0 0 0 0 -23546.9025 0 0 0
 90 pz 35.1
 91 pz 36.5
 92 pz 37.9
 93 pz 39.3
 94 pz 40.7
 95 pz 42.1
 96 pz 44.9
 97 pz 46.3
 98 pz 47.7
 99 pz 49.1
 100 pz 50.5
 101 pz 51.9
 102 pz 53.3
 103 pz 54.7
 104 pz 56.1
 105 pz 57.5
 106 pz 58.9
 107 pz 60.3
 108 pz 61.7
 109 pz 63.1
 110 pz 64.5
 111 pz 65.9
 112 sq 6.25 4 0 0 0 0 -25 0 5.50 0 \$ spine-mid, lower

113 pz 84.8
 114 sq 6.25 4 0 0 0 0 -25 0 1.45 0 \$ spine-upper
 141 sq 144 441 49 0 0 0 -1764 11 3 37 \$spleen
 142 sq 10.24 36 1.44 0 0 0 -23.04 0 -7.30 57.00 \$thymus
 176 5 cx 0.70
 177 5 px 0.10
 178 5 px 7.80
 700 s 13 -0.5 37.8 1.8
 701 s 13 -0.5 37.8 1.4
 702 s 13 -0.5 37.8 1.
 9001 rpp -500 500 -500 500 -500 500

[C e 11]

5 1 -1 -700 701 \$ PTV
 6 2 -1.6 702 -701 \$ CTV
 7 3 -1.6 -702 #5 #6 \$ GTV
 10 4 -1. -35 36 -37 -38 \$hati
 11 4 -1. -39 40 #5 #47 \$lambung
 12 4 -1. -40 \$kandungan lambung
 18 4 -1. (-48 175 37 -19):(-176 177 -178) #41 \$kerongkongan:thoracic+abdominal
 portion
 29 5 -1.04 (-75 89 90 -91):(-75 89 92 -93):(-75 89 94 -95):(-75 89 31 -96):(-75 89
 97 -98):(-75 89 99 -100):(-75 89 101 -102):(-75 89 103 -104):(-75 89 105 -106):(-
 75 89 107 -108):(-75 89 109 -110):
 (-75 89 111 -79) #10 \$rusuk
 41 5 -1.04 (-112 84 -90):(-112 90 -19):(19 -113 -114) \$tulangbelakang
 45 4 -1. (-135 65):(-136 -137) \$ginjal
 47 4 -1. (-138 139 -65):(-138 65 140) #5 #6 #7 \$pankreas
 48 4 -1 -141 #5 #6 #7 \$spleen atau limpa
 49 4 -1 -142 #5 #6 #7 \$thymus atau timus
 63 7 -1. ((-16 5 -19):(19 -6 -21 114)) #5 #6 #7 #10 #11 #12 #18 #29 #41 #45 #47
 #48 #49 \$badan/tubuh
 65 6 -0.00129 -9001 #63 #5 #6 #7 #10 #11 #12 #18 #29 #41 #45 #47 #48 #49
 100 -1 9001 \$ outer region

[Volume]

reg vol
 5 24.41664
 6 11.48821333
 7 4.186666667
 10 1830
 11 250
 29 721.76
 45 288
 47 8.38
 49 20.1

48 176
63 1410

[T R A N S F O R M]

*tr4 0.5 -3 50

*tr5 0 2.575 42.30 42.6 127.2266 107.676 50.584 39.416 90 76.4334 101.1157
17.675953

*tr40 0 -4 0 0 90 90 90 90 180 90 0 90 \$ 0 derajat

*tr50 19.8 -0.5 37.8 90 90 0 90 0 90 180 90 90 1

*tr60 13 -10 37.8 0 90 90 90 90 180 90 0 90 1

*tr70 21 -0.5 37.8 90 180 0 0 90 90 90 0 90 0

[multiplier]

Number = -201 \$photon jaringan lunak

interpolation = log

ne = 55

infl = {201.inp}{1-55}

[multiplier]

number = -204 \$photon hati

interpolation = log

ne = 55

infl = {204.inp}{1-55}

[multiplier]

Number = -205 \$photon lambung

interpolation = log

ne = 55

infl = {205.inp}{1-55}

[multiplier]

Number = -206 \$neutron jaringan lunak

interpolation = log

ne = 68

infl = {206.inp}{1-68}

[multiplier]

number = -208 \$neutron tulang

interpolation = log

ne = 68

infl = {208.inp}{1-68}

[multiplier]

Number = -209 \$neutron hati

interpolation = log

ne = 68

infl = {209.inp}{1-68}

[multiplier]

number = -210 \$neutron lambung

interpolation = log

ne = 68

[T - T r a c k] off

```

title = Track Detection in xyz mesh
mesh = xyz          # mesh type is xyz scoring mesh
x-type = 2          # x-mesh is linear given by xmin, xmax and nx
  nx = 1000         # number of x-mesh points
  xmin = -25.       # minimum value of x-mesh points
  xmax = 25.        # maximum value of x-mesh points
y-type = 1          # y-mesh is given by the below data
  ny = 1            # number of y-mesh points
  -5.0 5.0
z-type = 2          # z-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
  nz = 1000         # number of z-mesh points
  zmin = 20.        # minimum value of z-mesh points
  zmax = 50.        # maximum value of z-mesh points
e-type = 1          # e-mesh is given by the below data
  ne = 1            # number of e-mesh points
  0.0 5000.0
unit = 1            # unit is [1/cm^2/source]
axis = xz           # axis of output
file = track40_xz.out # file name of output for the above axis
part = neutron photon alpha proton
gshow = 1           # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
epsout = 1           # (D=0) generate eps file by ANGEL

```

[T - T R A C K]

```

title = Track Detection using [T-track] tally
mesh = xyz          # mesh type is xyz scoring mesh
x-type = 2          # x-mesh is linear given by xmin, xmax and nx
  xmin = -4.0       # minimum value of x-mesh points
  xmax = 20.0       # maximum value of x-mesh points
  nx = 1000         # number of x-mesh points
z-type = 1          # z-mesh is given by the below data
  nz = 1            # number of y-mesh points
  35.0 40.0
y-type = 2          # y-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
  ymin = -10.000    # minimum value of z-mesh points
  ymax = 10.000     # maximum value of z-mesh points
  ny = 1000         # number of z-mesh points
e-type = 1          # e-mesh is given by the below data
  ne = 1            # number of e-mesh points
  1.00000E-10 1.00000E+03
unit = 1            # unit is [1/cm^2/source]
material = all       # (D=all) number of specific material
2D-type = 3         # 1:Cont, 2:Clust, 3:Color, 4:xyz, 5:mat, 6:Clust+Cont,
7:Col+Cont
axis = xy           # axis of output

```

```

gshow = 1
file = lihat.out # file name of output for the above axis
part = neutron photon alpha proton
epsout = 1

```

[T - C r o s s] off

```

title = Energy distribution in region mesh
mesh = r-z      # mesh type is region-wise
x0 = 0.000000   # center x-position of r-z mesh
y0 = 0.000000   # center y-position of r-z mesh
r-type = 1      # r-mesh is linear given by rmin, rmax and nr
nr = 1
0 1
z-type = 2      # z-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
nz = 1000       # number of z-mesh points
zmin = 0
zmax = 20
e-type = 1      # e-mesh is log given by emin, emax and ne
ne = 3          # number of e-mesh points
0 5.0E-7
1 20
t-type = 1
nt = 1
0 1.0E9
unit = 1        # unit is [1/cm^2/MeV/source]
axis = z        # axis of output
file = bisfluxLLAT150.out # file name of output for the above axis
output = flux    # surface crossing flux
part = neutron
epsout = 1      # (D=0) generate eps file by ANGEL
trcl = 50

```

[T-track] off

```

title = Energy deposition in cell
mesh = r-z      # mesh type is region-wise
x0 = 0.000000   # center x-position of r-z mesh
y0 = 0.000000   # center y-position of r-z mesh
r-type = 1      # r-mesh is linear given by rmin, rmax and nr
nr = 1
0 1
z-type = 2      # z-mesh is linear given by zmin, zmax and nz
nz = 1000       # number of z-mesh points
zmin = 0
zmax = 20
e-type = 1      # e-mesh is log given by emin, emax and ne
ne = 3          # number of e-mesh points

```

```

0 5.0E-7
1 20
axis = z # axis of output
trcl = 50
file = biskedalamanLLAT150.out # file name of output for the above axis
part = all neutron photon
gshow = 1 # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
epsout = 1 # (D=0) generate eps file by ANGEL
multiplier = 6
part = photon
emax = 10000
mat mset1
1 (1 -201)
2 (1 -201)
3 (1 -201)
5 (1 -203)
4 (1 -206)
7 (1 -202)
multiplier = 6
part = neutron
emax = 10000
mat mset1
1 (1 -206)
2 (1 -206)
3 (1 -206)
5 (1 -208)
4 (1 -206)
7 (1 -208)
[ T-track ] off
title = Energy deposition in cell
mesh = reg # mesh type is region-wise
reg = 5 6 7 10 11 29 45 47 48 49 63
unit = 1 # unit is [Gy/source]
trcl = 50
axis = reg # axis of output
t-type = 1
nt = 1
0 1.0E9
file = bisregionLLAT150.out # file name of output for the above axis
part = all neutron photon
gshow = 1 # 0: no 1:bnd, 2:bnd+mat, 3:bnd+reg 4:bnd+lat
epsout = 1 # (D=0) generate eps file by ANGEL
e-type = 1
ne = 3 # number of e-mesh points
0 5.0E-7
1 20

```

```

      multiplier      = 6
      part      = photon
      emax      = 10000
      mat              mset1
      1              (1      -201)
      2      (1 -201)
      3              (1      -201)
      5              (1 -203)
      4              (1 -206)
      7              (1 -202)
      multiplier      = 6
      part      = neutron
      emax      = 10000
      mat              mset1
      1              (1      -206)
      2      (1 -206)
      3              (1      -206)
      5              (1 -208)
      4              (1 -206)
      7              (1      -208)
[ E n d ]

```

LAMPIRAN 2

Perhitungan Fraksi Massa Boron-10 pada Tiap Jaringan

Contoh perhitungan konsentrasi boron 150µg/g jaringan kanker

1. GTV (Gross Tumour Volume)

$$\begin{aligned}
 \text{Volume (V)} &= 4,19 \text{ cm}^3 \\
 \text{Massa jenis GTV } (\rho) &= 1,6 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Massa GTV (m}_{\text{GTV}}) &= V \times \rho \\
 &= 4,19 \text{ cm}^3 \times 1,6 \text{ g/cm}^3 \\
 &= 6,7 \text{ g} \\
 \text{Massa boron (m}_{\text{boron}}) &= \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times m_{\text{GTV}} \\
 &= 150 \mu\text{g/g} \times 6,7 \text{ g} \\
 &= 1,0048 \times 10^{-3} \text{ g} \\
 \text{Fraksi massa boron} &= \frac{m_{\text{boron}}}{m_{\text{boron}} + m_{\text{GTV}}} \\
 &= \frac{1,0048 \times 10^{-3} \text{ g}}{1,0048 \times 10^{-3} + 6,7} \\
 &= 1,49 \times 10^{-4}
 \end{aligned}$$

Fraksi total dalam jaringan

Atom	Fraksi massa lama	Fraksi massa baru
Hidrogen	0,099	0,098985152
Karbon	0,269	0,268959656
Nitrogen	0,045	0,044993251
Oksigen	0,569	0,568914663
Fosfor	0,018	0,0179973
Boron	-	0,000149978
Jumlah	1	1

2. CTV (Clinical Tumour Volume)

$$\begin{aligned}
 \text{Volume (V)} &= 11,49 \text{ cm}^3 \\
 \text{Massa jenis CTV } (\rho) &= 1,6 \text{ g/cm}^3 \\
 \text{Massa tumor (m}_{\text{CTV}}) &= V \times \rho \\
 &= 11,49 \text{ cm}^3 \times 1,6 \text{ g/cm}^3 \\
 &= 18,38 \text{ g} \\
 \text{Massa boron (m}_{\text{boron}}) &= 50 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times m_{\text{GTV}} \\
 &= 50 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 18,38 \text{ g} \\
 &= 0,001378586 \text{ g}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Fraksi massa boron} &= \frac{m_{\text{boron}}}{m_{\text{boron}} + m_{\text{GTV}}} \\ \text{Fraksi massa boron} &= \frac{0,001378586 \text{ g}}{0,001378586 + 18,38} \\ &= 7,49 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

Fraksi total dalam jaringan

Atom	Fraksi massa lama	Fraksi massa baru
Hidrogen	0,099	0,098992576
Karbon	0,269	0,268979827
Nitrogen	0,045	0,044996625
Oksigen	0,569	0,568957328
Fosfor	0,018	0,01799865
Boron	-	7,49944E-05
Jumlah	1	1

3. PTV (Planning Tumour Volume)

$$\begin{aligned}\text{Volume (V)} &= 24,42 \text{ cm}^3 \\ \text{Massa jenis PTV } (\rho) &= 1 \text{ g/cm}^3 \\ \text{Massa tumor } (m_{\text{PTV}}) &= V \times \rho \\ &= 24,42 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3 \\ &= 24,42 \text{ g} \\ \text{Massa boron } (m_{\text{boron}}) &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times m_{\text{PTV}} \\ &= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 24,42 \text{ g} \\ &= 3,66 \times 10^{-5} \text{ g} \\ \text{Fraksi massa boron} &= \frac{m_{\text{boron}}}{m_{\text{boron}} + m_{\text{PTV}}} \\ \text{Fraksi massa boron} &= \frac{3,66 \times 10^{-5} \text{ g}}{3,66 \times 10^{-5} + 24,42} \\ &= 1,49 \times 10^{-5}\end{aligned}$$

Fraksi total dalam jaringan

Atom	Fraksi massa lama	Fraksi massa baru
Hidrogen	0,104472	1,04E-01
Karbon	0,23219	2,32E-01
Nitrogen	0,02488	2,49E-02
Oksigen	0,630238	6,30E-01
Natrium	0,00113	1,13E-03

Atom	Fraksi massa lama	Fraksi massa baru
Magnesium	0,00013	1,30E-04
Fosfor	0,00133	1,33E-03
Sulfur	0,00199	1,99E-03
Klor	0,00134	1,34E-03
Kalium	0,00199	1,99E-03
Kalsium	0,00023	2,30E-04
Besi	0,00005	5,00E-05
Zinc	0,00003	3,00E-05
Boron		1,10E-05
Jumlah	1	1

4. Pankreas

$$\text{Volume (V)} = 8,38 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis pankreas } (\rho) = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Massa pankreas (mpankreas)} &= V \times \rho \\ &= 8,38 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3 \\ &= 8,38 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mpankreas} \\ &= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 8,38 \text{ g} \\ &= 1,25 \times 10^{-5} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{mboron}{mboron + mpankreas}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{1,25 \times 10^{-5} \text{ g}}{1,25 \times 10^{-5} + 8,38}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = 1,49 \times 10^{-5}$$

5. Lambung

$$\text{Volume (V)} = 250 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis lambung } (\rho) = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Massa lambung (mlambung)} &= V \times \rho \\ &= 250 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3 \\ &= 250 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mlambung} \\ &= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 250 \text{ g} \\ &= 3,75 \times 10^{-4} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{mboron}{mboron + mlambung}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{3,75 \times 10^{-4} g}{3,75 \times 10^{-4} + 240}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = 1,49 \times 10^{-5}$$

6. Limpa

$$\text{Volume (V)} = 176 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis limpa } (\rho) = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Massa limpa (mlimpa)} &= V \times \rho \\ &= 176 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3 \\ &= 176 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mlimpa} \\ &= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 176 \text{ g} \\ &= 2,64 \times 10^{-4} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{mboron}{mboron+mlimpa}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{2,64 \times 10^{-4} g}{2,64 \times 10^{-4} + 176}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = 1,49 \times 10^{-5}$$

7. Kulit badan

$$\text{Volume (V)} = 1410 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis kulit } (\rho) = 1 \text{ g/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{Massa kulit (mkulit)} &= V \times \rho \\ &= 1410 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/cm}^3 \\ &= 1410 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mkulit} \\ &= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 1410 \text{ g} \\ &= 2,11 \times 10^{-3} \text{ g} \end{aligned}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{mboron}{mboron+mkulit}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = \frac{2,11 \times 10^{-3} g}{2,11 \times 10^{-3} + 1410}$$

$$\text{Fraksi massa boron} = 1,49 \times 10^{-5}$$

8. Tulang rusuk

$$\text{Volume (V)} = 694 \text{ cm}^3$$

$$\text{Massa jenis rusuk } (\rho) = 1,04 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Massa rusuk (mrusuk)} = V \times \rho$$

$$\begin{aligned}
&= 694 \text{ cm}^3 \times 1,04 \text{ g/ cm}^3 \\
&= 721,76 \text{ g} \\
\text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mrusuk} \\
&= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 721,76 \text{ g} \\
&= 1,08 \times 10^{-3} \text{ g} \\
\text{Fraksi massa boron} &= \frac{mboron}{mboron+mrusuk} \\
\text{Fraksi massa boron} &= \frac{1,08 \times 10^{-3} \text{ g}}{1,08 \times 10^{-3} + 721,76} \\
\text{Fraksi massa boron} &= 1,49 \times 10^{-5}
\end{aligned}$$

9. Hati

$$\begin{aligned}
\text{Volume (V)} &= 1830 \text{ cm}^3 \\
\text{Massa jenis hati } (\rho) &= 1 \text{ g/cm}^3 \\
\text{Massa hati (mhati)} &= V \times \rho \\
&= 1830 \text{ cm}^3 \times 1 \text{ g/ cm}^3 \\
&= 1830 \text{ g} \\
\text{Massa boron (mboron)} &= 10 \% \times \text{konsentrasi } (\mu\text{g/g}) \times \text{mhati} \\
&= 10 \% \times 150 \mu\text{g/g} \times 1830 \text{ g} \\
&= 2,74 \times 10^{-2} \text{ g} \\
\text{Fraksi massa boron} &= \frac{mboron}{mboron+mhati} \\
\text{Fraksi massa boron} &= \frac{2,74 \times 10^{-2} \text{ g}}{2,74 \times 10^{-2} + 1830} \\
\text{Fraksi massa boron} &= 1,49 \times 10^{-5}
\end{aligned}$$

LAMPIRAN 3

Perhitungan Laju Dosis

Contoh perhitungan laju dosis tiap komponen radiasi dan laju dosis total pada kanker dengan konsentrasi Boron-10 150 µg/g jaringan kanker.

1. laju dosis hamburan neutron

$$\dot{D} = 5,03 \times 10^{-5} \text{ Gy/detik}$$

2. Laju dosis sinar gamma

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{thermal}} &= 1,03 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ m_{\text{kanker}} &= 0,006698667 \text{ kg} \\ Ar_{\text{Hidrogen kanker}} &= 2 \text{ g/mol} \\ m_{\text{hidrogen}} &= 0,66306854 \text{ gr} \\ N_{\text{Hidrogen kanker}} &= \frac{\left(\frac{m(g)}{Ar(\frac{g}{mol})} \right)_{\text{Hidrogen}} \cdot 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{\text{kanker}}(kg)} \\ &= \frac{\left(\frac{0,66306854}{2} \right) \cdot 6,023 \times 10^{23}}{0,006698667} \\ N_{\text{Hidrogen kanker}} &= 2,98 \times 10^{25} \text{ atom/kg} \\ \sigma_{\text{Hidrogen}} &= 3,31960 \times 10^{-25} \text{ cm}^2 \\ \Delta &= 2,33 \cdot 1,6 \times 10^{-13} \\ \Delta &= 3,728 \times 10^{-13} \text{ Gy.kg/Bq.s} \\ \ddot{R} &= N_{\text{Hidrogen kanker}} \cdot \Phi_{\text{thermal}} \cdot \sigma_{\text{Hidrogen}} \\ &= 2,98 \times 10^{25} \cdot 1,03 \times 10^8 \cdot 3,31960 \times 10^{-25} \\ \ddot{R} &= 1,068 \times 10^9 \text{ Bq/kg} \\ \phi &= 5,84 \times 10^{-2} \text{ (hasil interpolasi pada tabel fraksi serapan dengan sumber berada di pankreas dan target adalah pankreas, lihat Lampiran 5)} \\ \dot{D}_{\gamma} &= \ddot{R} \cdot \phi \cdot \Delta \\ &= 1,068 \times 10^9 \cdot 5,84 \times 10^{-2} \cdot 3,728 \times 10^{-13} \\ \dot{D}_{\gamma} &= 2,32 \times 10^{-5} \text{ Gy/s} \end{aligned}$$

3. Laju dosis boron

$$\begin{aligned} \Phi_{\text{thermal}} &= 1,03 \times 10^8 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ m_{\text{kanker}} &= 0,006698667 \text{ kg} \\ Ar_{\text{boron}} &= 10,81 \text{ g/mol} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{boron} &= 3,8637 \times 10^{-21} \text{ cm}^2 \\
m_{boron} &= 0,0010048 \text{ g} \\
E &= 2,33 \text{ MeV} \cdot 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \\
&= 3,728 \times 10^{-13} \text{ J} \\
N_{boron} &= \frac{\left(\frac{m(g)}{Ar(\frac{g}{mol})} \right)_{Hidrogen} \cdot 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{kanker}(kg)} \\
&= \frac{\left(\frac{0,0010048}{10,81} \right) \cdot 6,023 \times 10^{23}}{0,006698667} \\
N_{boron} &= 8,36 \times 10^{21} \text{ atom/kg} \\
\dot{D}_{boron} &= N_{boron} \cdot \Phi_{termal} \cdot \sigma_{boron} \cdot E \\
&= 8,36 \times 10^{21} \cdot 1,03 \times 10^8 \cdot 3,8637 \times 10^{-21} \cdot 3,728 \times 10^{-13} \\
\dot{D}_{boron} &= 1,42 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

4. Laju dosis proton

$$\begin{aligned}
\Phi_{termal} &= 1,03 \times 10^8 \\
m_{kanker} &= 0,006698667 \text{ kg} \\
Ar_{nitrogen} &= 14,008 \text{ g/mol} \\
\sigma_{nitrogen} &= 1,8269 \times 10^{-24} \text{ cm}^2 \\
m_{nitrogen} &= 0,301394791 \text{ g} \\
E &= 0,63 \text{ MeV} \times 1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV} \\
&= 1,008 \times 10^{-13} \text{ J} \\
N_{nitrogen} &= \frac{\left(\frac{m(g)}{Ar(\frac{g}{mol})} \right)_{Hidrogen} \times 6,023 \times 10^{23} \text{ atom/mol}}{m_{kanker}(kg)} \\
&= \frac{\left(\frac{0,301394791}{14,008} \right) \cdot 6,023 \times 10^{23}}{0,006698667} \\
N_{nitrogen} &= 1,94 \times 10^{24} \\
\dot{D}_{proton} &= N_{nitrogen} \cdot \Phi_{termal} \cdot \sigma_{nitrogen} \cdot E \\
&= 1,94 \times 10^{24} \cdot 1,03 \times 10^8 \cdot 1,8269 \times 10^{-24} \cdot 1,008 \times 10^{-13} \\
\dot{D}_{proton} &= 4,04 \times 10^{-5} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

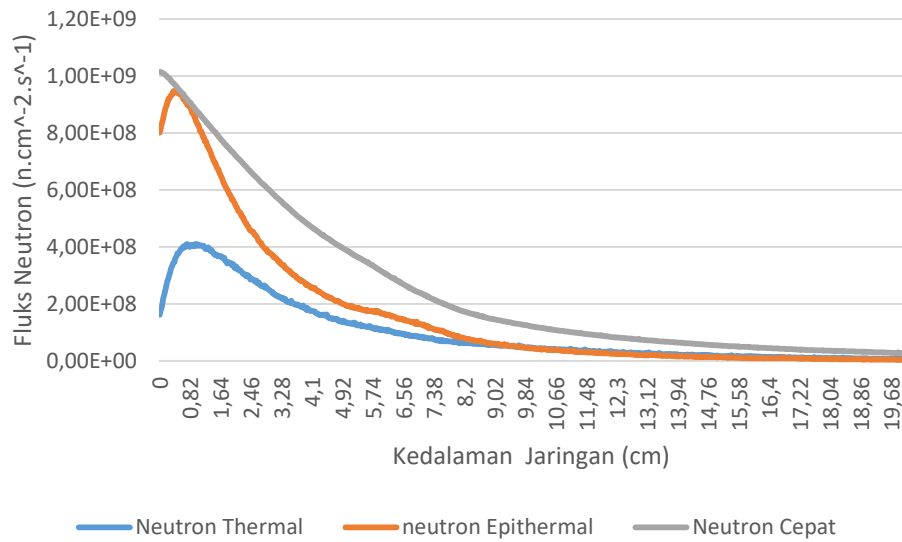
5. Laju dosis total

$$\begin{aligned}
\dot{D}_{total} &= (W_{boron} \cdot \dot{D}_{boron}) + (W_p \cdot \dot{D}_p) + (W_n \cdot \dot{D}_{neutron}) + (W_\gamma \cdot \dot{D}_\gamma) \\
\dot{D}_{total} &= (3,8 \cdot 1,42 \times 10^{-3}) + (3,2 \cdot 4,04 \times 10^{-5}) + (3,2 \cdot 5,03 \times 10^{-5}) \\
&\quad + (1 \cdot 2,32 \times 10^{-5}) \\
\dot{D}_{total} &= 5,72 \times 10^{-3} \text{ Gy/detik}
\end{aligned}$$

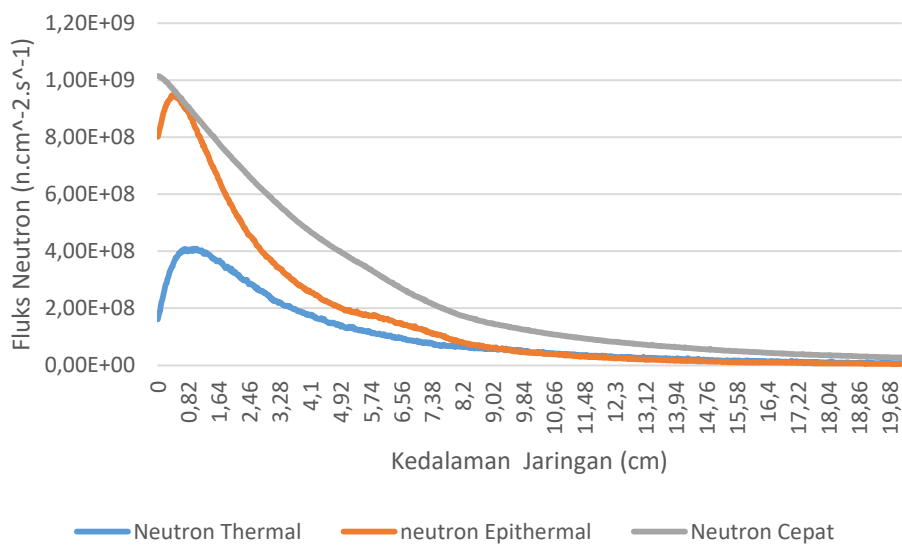
LAMPIRAN 4

Fluks Neutron tiap Konsentrasi Boron

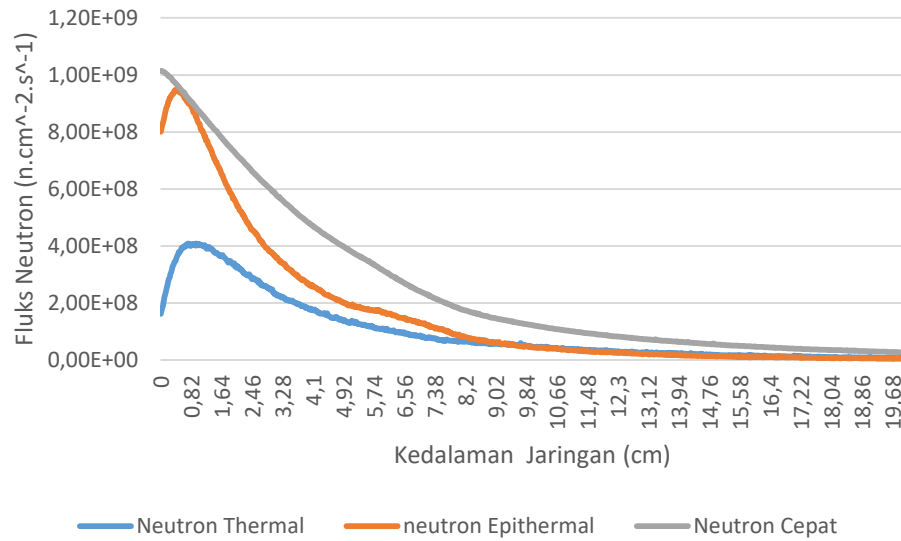
1. Konsentrasi boron 100 $\mu\text{g/g}$



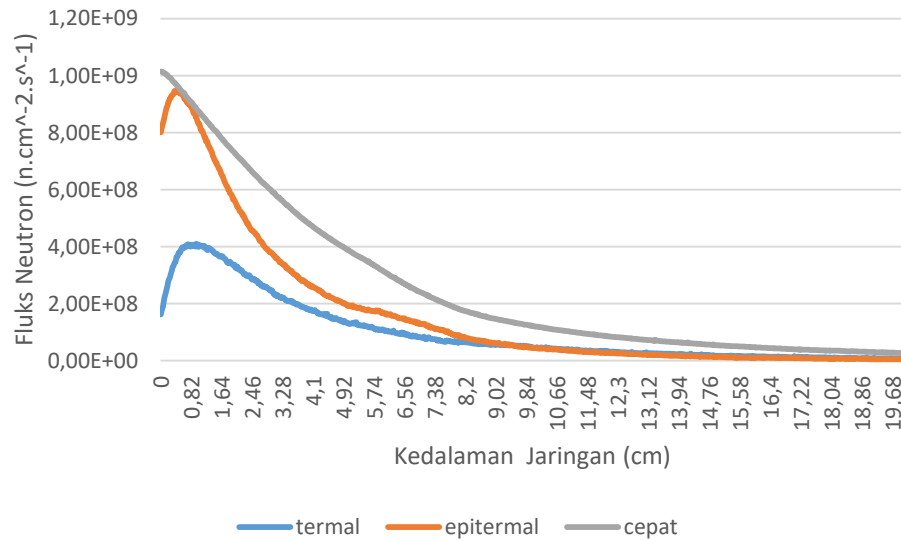
2. Konsentrasi boron 110 $\mu\text{g/g}$



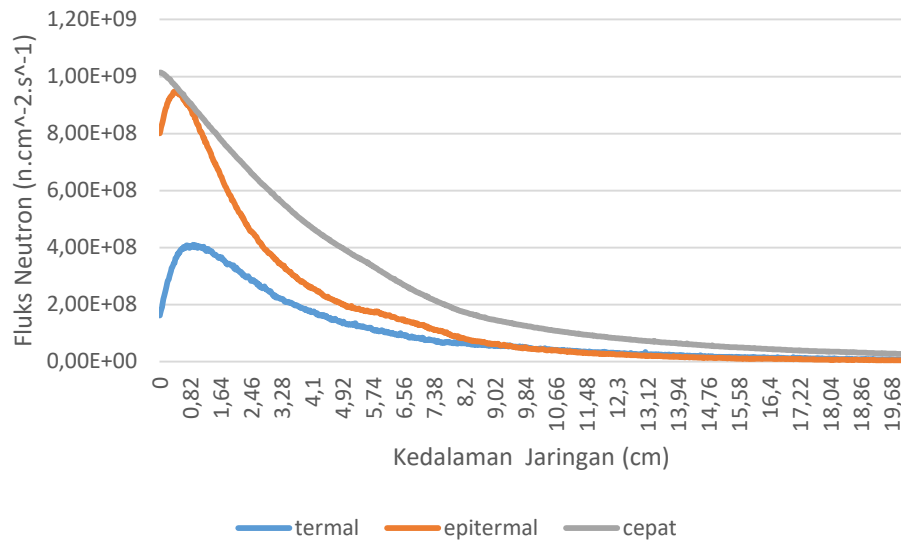
3. Konsentrasi boron 120 µg/g



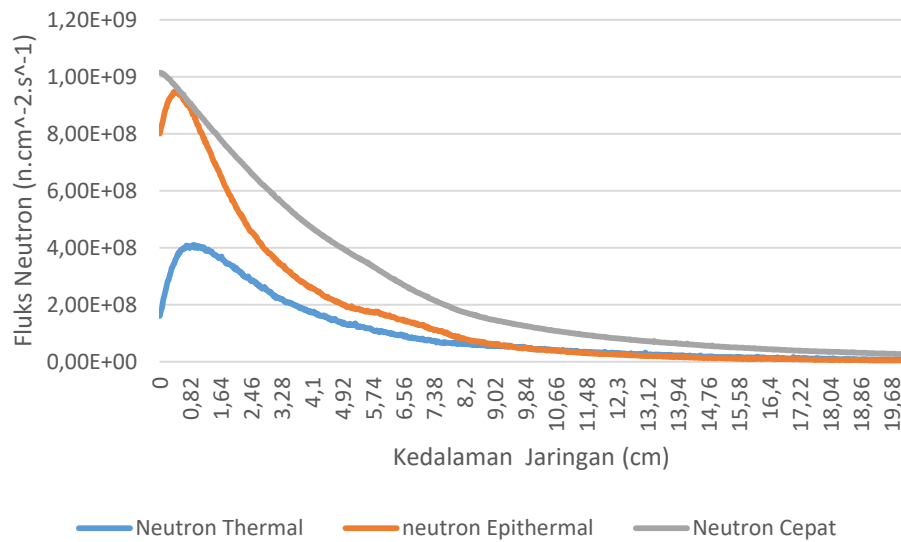
4. Konsentrasi boron 130 µg/g



5. Konsentrasi boron 140 µg/g



6. Konsentrasi boron 150 µg/g



LAMPIRAN 5

Perhitungan waktu iradiasi dan dosis serap

1. Waktu iradiasi

Waktu iradiasi diperoleh dengan membandingkan dosis standar dengan laju dosis serap total pada kanker. Tingkat waktu iradiasi efektif diperoleh melalui persamaan :

$$t_{iradiasi} = \frac{Dosis\ Standar}{laju\ dosis\ radiasi}$$

$$t_{iradiasi} = \frac{50\ Gy}{laju\ dosis\ radiasi}$$

Konsentrasi Boron ($\mu\text{g/g}$)	Laju dosis total (Gy/detik)	Waktu iradiasi (detik)	Waktu iradiasi
100	$4,05 \times 10^{-3}$	12285,87	3 jam 25 menit 46 detik
110	$4,40 \times 10^{-3}$	11312,35	3 jam 9 menit 32 detik
120	$4,72 \times 10^{-3}$	10539,87	2 jam 56 menit 40 detik
130	$5,06 \times 10^{-3}$	9843,92	2 jam 44 menit 4 detik
140	$5,38 \times 10^{-3}$	9259,50	2 jam 34 menit 19 detik
150	$5,72 \times 10^{-3}$	8736,72	2 jam 26 menit 37 detik

2. Dosis Serap

Nilai dosis serap diperoleh dengan mengalikan nilai laju dosis dengan waktu iradiasi sesuai konsentrasi boron. nilai dosis menggunakan persamaan berikut:

$$D = \dot{D} \cdot t_{iradiasi}$$

Jaringan	Dosis serap total (Gy)					
	100 µg/g	110 µg/g	120 µg/g	130 µg/g	140 µg/g	150 µg/g
Kulit	1,97	1,88	1,83	1,77	1,73	1,69
Rusuk	6,17	5,97	5,88	5,78	5,71	5,62
Pankreas	4,42	4,24	4,06	3,94	3,83	3,74
Lambung	1,91	1,81	1,75	1,69	1,65	1,62
Limpa	3,69	3,53	3,39	3,27	3,17	3,08
Hati	1,21	1,21	1,21	1,21	1,17	1,17
PTV	8,10	7,95	7,82	7,69	7,62	7,55
CTV	29,78	28,83	27,89	27,75	27,60	27,49
GTV	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00

LAMPIRAN 6

Data fraksi dosis serap gama

Specific Absorbed Fraction of Photon Energy in kg-1: Recommended Values for Age 15 Male or Adult Female

Source = Pancreas	Energy (MeV)									
	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	4.000
Target	0.010	0.015	0.020	0.030	0.050	0.100	0.200	0.500	1.000	4.000
Adrenals	7.75E-09	1.30E-03	2.60E-02	1.10E-01	9.56E-02	6.68E-02	6.06E-02	5.13E-02	4.50E-02	4.08E-02
UB Wall	0.0	0.0	2.68E-09	1.95E-05	3.89E-04	8.23E-04	1.17E-03	1.35E-03	1.41E-03	1.43E-03
Bone Sur	1.90E-06	9.53E-05	1.53E-03	1.10E-02	2.01E-02	1.29E-02	7.11E-03	4.78E-03	4.22E-03	3.95E-03
Brain	0.0	0.0	2.01E-08	5.07E-06	2.88E-05	8.16E-05	1.54E-04	1.95E-04	2.33E-04	2.46E-04
Breasts	0.0	0.0	2.49E-06	6.56E-04	2.95E-03	3.57E-03	3.58E-03	4.02E-03	3.98E-03	3.92E-03
St Wall	1.89E-03	4.49E-02	1.20E-01	1.68E-01	1.23E-01	7.63E-02	6.86E-02	6.74E-02	5.86E-02	5.14E-02
SI Wall	0.0	1.71E-07	8.55E-05	3.33E-03	9.84E-03	1.03E-02	8.98E-03	7.86E-03	7.68E-03	7.17E-03
ULI Wall	0.0	3.66E-07	1.86E-04	4.44E-03	1.34E-02	1.22E-02	1.02E-02	8.65E-03	8.62E-03	8.05E-03
LLI Wall	0.0	1.85E-10	2.80E-06	4.70E-04	2.40E-03	3.26E-03	2.71E-03	2.99E-03	3.01E-03	2.93E-03
Kidneys	0.0	6.31E-05	4.07E-03	3.02E-02	4.16E-02	3.16E-02	2.71E-02	2.60E-02	2.46E-02	2.27E-02
Liver	2.54E-05	6.91E-04	7.19E-03	2.92E-02	3.46E-02	2.59E-02	2.22E-02	2.03E-02	1.88E-02	1.73E-02
ET1-bas	0.0	0.0	0.0	2.97E-06	1.30E-04	3.80E-04	5.60E-04	7.40E-04	8.00E-04	9.30E-04
ET2-bas	0.0	0.0	0.0	2.97E-06	1.30E-04	3.80E-04	5.60E-04	7.40E-04	8.00E-04	9.30E-04
LN-ET	0.0	0.0	0.0	2.97E-06	1.30E-04	3.80E-04	5.60E-04	7.40E-04	8.00E-04	9.30E-04
BBI-bas	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
BBI-sec	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
bbe-sec	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
AI	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
LN-Th	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
Lng Tiss	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
Lung NP	0.0	0.0	0.0	2.97E-06	1.30E-04	3.80E-04	5.60E-04	7.40E-04	8.00E-04	9.30E-04
Lung IB	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
Lung P	1.70E-07	3.72E-05	1.70E-03	1.33E-02	1.70E-02	1.27E-02	1.11E-02	1.03E-02	1.01E-02	9.00E-03
Muscle	2.62E-03	7.25E-03	1.16E-02	1.40E-02	1.10E-02	8.03E-03	7.37E-03	7.22E-03	6.94E-03	5.94E-03
Ovaries	0.0	0.0	1.88E-07	1.87E-04	1.49E-03	3.60E-03	3.53E-03	3.71E-03	3.69E-03	3.15E-03
Pancreas	1.38E+01	1.06E+01	7.17E+00	3.19E+00	1.17E+00	6.74E-01	7.13E-01	7.55E-01	7.07E-01	5.84E-01
R Marrow	9.22E-07	3.68E-05	5.04E-04	3.35E-03	6.90E-03	7.71E-03	7.38E-03	7.64E-03	6.58E-03	6.04E-03
Skin	2.20E-10	2.33E-07	3.26E-05	5.79E-04	1.64E-03	1.70E-03	1.78E-03	1.87E-03	2.02E-03	2.16E-03
Spleen	1.43E-03	4.15E-02	1.31E-01	1.85E-01	1.30E-01	7.98E-02	7.21E-02	6.81E-02	6.17E-02	5.68E-02
Testes	0.0	0.0	0.0	5.40E-07	4.61E-05	1.90E-04	3.14E-04	4.68E-04	5.51E-04	5.88E-04
Thymus	0.0	0.0	6.36E-07	3.29E-04	2.01E-03	4.01E-03	3.39E-03	3.78E-03	3.39E-03	3.01E-03
Thyroid	0.0	0.0	0.0	2.97E-06	1.30E-04	3.80E-04	5.60E-04	7.40E-04	8.00E-04	9.30E-04
GB Wall	4.14E-05	1.11E-02	3.66E-02	9.15E-02	8.47E-02	5.65E-02	4.78E-02	4.27E-02	4.66E-02	3.58E-02
Rt Wall	0.0	1.76E-05	2.26E-03	1.61E-02	2.88E-02	2.24E-02	1.93E-02	1.84E-02	1.52E-02	1.44E-02
Uterus	0.0	0.0	1.23E-07	1.51E-04	1.24E-03	2.94E-03	2.81E-03	2.92E-03	2.58E-03	2.50E-03